

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та організації виробництва

Кваліфікаційна робота допущена
до захисту.

Гарант освітньої програми «Управління модернізацією металургії»

_____ Едуард ГРИБКОВ
9 липня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»
за підсумками виконання міждисциплінарної
освітньо-наукової програми «Управління модернізацією металургії»
за спеціальностями 073 Менеджмент та 136 Металургія
на тему:
«Управління проектом модернізації виробництва безперервнолітої
заготовки із розширенням сортаменту в умовах
ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»»

Керівники роботи



Едуард ГРИБКОВ
Лариса ШАУЛЬСЬКА

Консультант від бази практики



Сергій БУТАКОВ

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач:



Руслан КРЮКОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК



(підпис)

Олександр КУРПЕ

Запоріжжя, 2025

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>Гірничо-металургійний факультет</u>
Кафедра	<u>Металургії та організації виробництва</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія, 073 Менеджмент</u>
ОНП	<u>Управління модернізацією металургії</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОНП

Едуард ГРИБКОВ

«31» березня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Крюкова Руслана Євгенійовича
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Управління проєктом модернізації виробництва безперервнолитої заготовки із розширенням сортаменту в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Керівник роботи Грибков Едуард Петрович, д-р. техн. наук, проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 31.03.2025 р. №82/31.03.2025

2. Термін подання роботи 01.07.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Навчальна література, державні стандарти, методична література з дисциплін, що стосуються модернізації металургійного виробництва та управління проєктами, науково-дослідні роботи з оптимізації процесів безперервного лиття заготовок, літературні джерела, технологічні регламенти, дані ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» м. Кам'янське, результати власних досліджень і техніко-економічного аналізу тощо.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) *1. Аналітичний розділ: сучасні технології бездоменного виробництва сталі.*

2. Технологічний розділ: моделі модернізації ГЗК та ПрАТ «Камет-сталь», обґрунтування вибору слябінгової МБЛЗ. Менеджмент стійкого розвитку. 3. Менеджмент: нова модель управління ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», структура управління підрозділом МБЛЗ.

4.Склад обладнання: двострумкова машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).Перелік графічного демонстраційного матеріалу: з планом розташування обладнання слябінгової МБЛЗ.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта

7. Дата видачі завдання 31.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Реферат, зміст, вступ	31.03...14.04
2	Розділ 1. Теоретичний розділ (аналітико-пошуковий)	15.04 – 25.04
3	Розділ 2. Дослідницький розділ (аналітично-розрахунковий)	26.04 – 10.05
4	Розділ 3. Технологічний розділ	11.05 – 22.05
5	Розділ 4. Охорона праці	23.05 – 31.05
6	Розділ 5. Економічний розділ	01.06 – 08.06
7	Висновки, перелік посилань	09.06 – 14.06
8	Оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	15.06 – 24.06
9	Подання завершеної роботи. Перевірка на відсутність академічного плагіату	30.06...05.07

Здобувач



Крюков РУСЛАН

Керівники роботи



Едуард ГРИБКОВ



Лариса ШАУЛЬСЬКА

РЕФЕРАТ

Розрахунково пояснювальна записка містить сторінок - 310, таблиць - 32, рисунків - 85, джерел – 44.

Об'єкт дослідження – процес виробництва безперервнолитої заготовки та виробничо-організаційна структура ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» у контексті модернізації металургійного обладнання..

Мета дипломного проекту – техніко-економічне обґрунтування модернізації виробництва на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» шляхом впровадження сучасної слябінгової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), інтегрованої в бездоменну металургійну схему з використанням технологій прямого відновлення заліза, електродугових печей та установок вторинної металургії, а також розробка ефективної моделі управління підприємством в умовах цифрової трансформації, військового стану та стратегії сталого розвитку.

МОДЕРНІЗАЦІЯ, БЕЗДОМЕННЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ, СЛЯБІНГОВА МБЛЗ, МАШИНА БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК, СЛЯБ, ЛИСТОПРОКАТНА ПРОДУКЦІЯ, ПРЯМЕ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА, MIDREX, ENERGIRON, ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ (EAF), ВТОРИННА МЕТАЛУРГІЯ, ПІЧ-КІВШ (LF), ВАКУУМНЕ ОБЕЗВУГЛЕЦЮВАННЯ (VD, RH, VOD), ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНИЙ МОДУЛЬ (LPM), ПРОДУКТИВНІСТЬ, УПРАВЛІННЯ ЗМІНАМИ, ГНУЧКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ, LEAN, AGILE, KAIZEN, РМО, СТАЛИЙ РОЗВИТОК, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ, РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТ, КАМЕТ-СТАЛЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ (стан питання)	12
1.1. Технології прямого відновлення заліза.....	12
1.2. Технологія Midrex	13
1.3. Технологія Energiron NYL.....	25
1.4. Energiron ZR: «Zero Reformer» – сучасна схема.....	33
1.5. Сучасні електродугові печі (EAF) загального призначення	43
1.6. Сучасні установки піч-ківш (LF) та вакуумного обезвуглецювання сталі (VD, VOD, RH)	63
1.7. Ливарно-прокатні модулі: сучасний стан і перспективи	71
1.7. Сучасні машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) у світі.....	85
1.8. Слябові машини безперервного лиття (для лиття слябів)	91
1.9. Сучасні підходи до менеджменту на металургійних підприємствах.....	96
1.10. Обґрунтування вибору слябової машини безперервного лиття.....	110
1.11. Сучасні підходи до менеджменту в умовах модернізації	113
2. МОДЕЛІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГЗК та КАМЕТСТАЛІ	117
2.1 Модель №1 будівництва DRP-заводу на ГЗК для виробництва НВІ.....	117
2.2 Модель №2 металургійне виробництво без використання доменного процесу на Каметсталі.....	126
2.3 Обґрунтування вибору слябінгової МБЛЗ як першого етапу модернізації виробництва сталі на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	137
2.4 Менеджмент стійкого розвитку в умовах війни та цифрової трансформації	145
2.5 Висновки та стратегічний напрям трансформації	176
3. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ КОМБІНАТУ «КАМЕТ-СТАЛЬ».....	181
3.1 Оновлена модель управління комбінатом	181
3.2 Структура управління підрозділом МБЛЗ.....	184
4. СКЛАД ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ДВОХСТРУМКОВОЇ МБЛЗ НА «КАМЕТСТАЛІ».....	205
4.1 Склад обладнання	205
4.2 Зона ролзиву CASTER HEAD ZONE	207
4.3 Зона кристалізатора та механізм качання (MOULD AND OSCILLATOR AREA).....	225
4.3 Дільниця вторинного охолодження (SEGMENTS AREA).....	249
4.4 Зона транспортування та відвантаження DISCHARGE AREA:	269
4.5. Технологічна частина	285
4.6 Розрахунок параметрів МБЛЗ.....	294
5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ НА МБЛЗ	296

ВИСНОВКИ	303
Доцільність впровадження слябової МБЛЗ з технічної та економічної точки зору: впровадження нової слябової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є стратегічно обґрунтованим рішенням, яке поєднує технічну доцільність, економічну ефективність та відповідає довгостроковим цілям розвитку підприємства і всієї Групи «МЕТІНВЕСТ».	303
Впровадження системи управління модернізацією.....	304
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	307

ВСТУП

Актуальність теми роботи. У світовій металургії спостерігається стрімкий перехід до бездоменних технологій виробництва сталі з акцентом на зниження викидів CO₂, підвищення енергоефективності та відповідність критеріям сталого розвитку. Водночас Україна, перебуваючи в умовах воєнного стану, зіткнулася з потребою швидкої модернізації промислової інфраструктури, зокрема металургійних підприємств, для збереження конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішньому ринках.

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» має стратегічну мету – інтеграція у глобальний ланцюг виробництва листопрокатної продукції, яка неможлива без оновлення сталевиробничого комплексу. Наявна сортова МБЛЗ не відповідає вимогам до розмірів, гнучкості та якості продукції, що обмежує технологічні можливості підприємства.

У цьому контексті впровадження слябінгової машини безперервного лиття заготовок, адаптованої до сучасних технологічних рішень та цифрових систем управління, є не лише технічно необхідним, а й критично важливим для забезпечення сталого розвитку підприємства в умовах трансформаційної економіки. Це визначає високу актуальність теми дослідження.

Постановка проблеми. Сучасні виклики у металургійній галузі України, зумовлені глобальними тенденціями декарбонізації, зростанням конкуренції, логістичними обмеженнями воєнного часу та необхідністю адаптації до європейських стандартів, потребують переходу від застарілих доменних схем до бездоменного виробництва сталі. В умовах

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» виникла об'єктивна потреба у модернізації ланцюга сталевиробництва з орієнтацією на виробництво листопрокатної продукції великого формату.

Існуюча сортова машина безперервного лиття заготовок не забезпечує необхідної гнучкості, сортаменту та продуктивності для виготовлення слябів, придатних до подальшого прокатування у рулонах великої маси. Крім того, відсутність сучасної управлінської моделі та цифрової інтеграції обмежує ефективність виробничих процесів у період трансформації.

Таким чином, постає завдання розробити техніко-економічно обґрунтовану модель модернізації, що передбачає впровадження сучасної слябінгової МБЛЗ, адаптацію менеджменту до умов воєнного часу, цифровізацію технологічних процесів та інтеграцію підприємства в нову парадигму бездоменного сталевиробництва.

Мета дослідження. Удосконалення процесу виробництва безперервнолитої заготовки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» з метою розширення сортаменту продукції на плити, листи

Задачі дослідження:

– Проаналізувати бездоменне виробництво сталі: технології прямого відновлення (Midrex, Energiron), ЕДП, установки LF, VD, RH та їхню інтеграцію з слябінговими МБЛЗ у сучасних ЛПМ.

– Вивчити модель менеджменту ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та сучасні управлінські тенденції: цифровізація, Agile, Lean, Kaizen, РМО, управління змінами.

– Розробити проект організації виробництва: склад та план розміщення обладнання слябінгової МБЛЗ з урахуванням інфраструктури підприємства.

– Запропонувати нову модель управління в умовах війни: гнучкість, цифрова трансформація, ризик-менеджмент, структура підрозділу МБЛЗ.

– Впровадити технологічні рішення в модернізовану МБЛЗ для підвищення якості слябів і зниження собівартості продукції.

– Розробити проєкт управління модернізацією МБЛЗ: етапи будівництва, цифровізація, управління ризиками, підвищення ефективності.

Об'єкт дослідження – сучасні технології бездоменного виробництва сталі та виробничо-організаційна структура ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Предмет дослідження – сучасна слябінгова машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) із діапазоном розмірів заготовки 900...1850 мм по ширині та 150...250 мм по товщині, призначена для виробництва напівфабрикатів під листовий прокат.

Результати та обґрунтування їх новизни / інноваційності.

У ході дослідження було обґрунтовано технічну та економічну доцільність впровадження нової слябінгової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) з діапазоном розмірів 900–1850 мм по ширині та 150–250 мм по товщині в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Запропоноване рішення є ключовим етапом у переході підприємства до бездоменного виробництва сталі, що базується на технологіях прямого відновлення заліза (Midrex, Energiron) та сучасних електродугових печах.

Інноваційність проєкту полягає у комплексному підході: поєднанні новітніх металургійних технологій із цифровими системами керування (Q-COOL, Q-CORE, Q-MAP), гнучкою структурою управління та адаптивною моделлю модернізації в умовах війни. Розроблено оновлену

модель менеджменту з урахуванням вимог Industry 4.0, цифрової трансформації та стійкого розвитку, що дозволяє забезпечити високу якість слябів, знизити собівартість та підвищити ефективність виробництва.

Запропоноване технічне рішення відповідає міжнародним стандартам і створює підґрунтя для подальшого розширення виробництва листопрокатної продукції, орієнтованої на внутрішній та зовнішній ринки.

1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ (стан питання)

1.1. Технології прямого відновлення заліза

Пряме відновлення заліза (DRI – Direct Reduced Iron) – це сучасний метод виробництва металізованого залізного продукту шляхом відновлення залізної руди у твердому стані без доменного процесу. Ці технології дозволяють значно знизити викиди CO₂ порівняно з доменним виробництвом сталі (на 40–60% менше викидів при маршруті DRI–EAF проти традиційного доменного [1]). У світі понад 82% DRI виробляється у шахтних печах, з яких близько 65% припадає на технологію Midrex та ~17% – на технологію Energiron (HYL) [1].

Нижче розглянуто три основні процеси прямого відновлення – Midrex, Energiron HYL та його варіант Energiron ZR (Zero Reformer) – з точки зору їх технічних характеристик, технологічних схем, прикладів реалізації, екологічного впливу та економічних показників. Особливу увагу приділено проектам в Україні, Європі та США.

Доповнюючи ці технології, сучасні металургійні комбінати також впроваджують литейно-прокатні модулі (ЛПМ) з безперервним литтям слябів, що дозволяє суттєво скоротити енергоспоживання та втрати металу [1]. Крім того, все більшого поширення набуває вакуумна обробка сталі в печі-ковші, яка забезпечує глибоку десульфуріацію, дегазацію та контроль складу сталі перед розливом, що особливо важливо для виробництва високоякісних марок [1].

1.2. Технологія Midrex

Midrex – найпоширеніша у світі технологія прямого відновлення заліза, запатентована компанією Midrex Technologies (підрозділ Kobe Steel). На кінець 2022 року установки Midrex забезпечували ~80% світового виробництва DRI шахтним методом [2], сумарно виробивши понад 1,32 млрд тонн DRI з початку впровадження процесу [2]. Ця технологія діє з 1969 року і постійно вдосконалюється, залишаючись еталоном надійності та продуктивності у галузі [2].

Технічні характеристики та принцип роботи

Реактор і сировина: Процес Midrex здійснюється у вертикальній шахтній печі (реакторі шахтового типу) при невисокому тиску газу (~1,5 атм або 0,15 МПа) [3]. Як сировина використовуються окатки або грудковий залізняк; витрати залізорудної сировини складають приблизно 1,45 т руди на 1 т DRI [3]. при ступені металізації продукту 92–96% Fe [3].

Відновлювальний газ: Основним відновником є суміш монооксиду вуглецю (CO) та водню (H_2), що отримується шляхом риформінгу природного газу. Природний газ (CH_4) пропускається через каталізатор у трубчастому риформері, де при ~900–1000°C перетворюється на $CO+H_2$. Отриманий синтез-газ подається в шахту знизу назустріч потоку руди (протитечія). Тепло і реакції відновлюють Fe_2O_3/Fe_3O_4 до металевого Fe. Для регулювання температури та накарбюризації DRI частина природного газу може вводиться безпосередньо у шахту (байпас риформера) [3]. Співвідношення H_2/CO в газі типово ~1,5 (може варіювати) [3].

Рециркуляція газу: Відпрацьований топовий газ (після проходження через шар руди) містить невідновлений CO/H₂, оксиди вуглецю (CO₂) та водяну пару. Цей газ очищується (через скрубери) від пилу і H₂O, потім компримується, змішується зі свіжим риформованим газом і знову нагрівається для подачі в піч [4]. Таким чином, процес замкнений по газу, що підвищує енергоефективність (рециркуляція забезпечує високий коефіцієнт використання енергії) [4]. Надлишковий CO₂ може бути частково вилучений з оборотного газу за необхідності (опція установки CO₂-абсорбера).

Продукт DRI: Залізородні окатки відновлюються до губчастого заліза з високою металізацією (92–96% Fe). Вміст вуглецю в DRI регулюється подачею природного газу: типово 1–2% C, максимально до ~3,5% C [3]. Вищий вміст вуглецю покращує плавку в електропечі за рахунок екзотермічного окиснення вуглецю. Продукт може вивантажуватися як холодний DRI (≈50 °C) або брикетуватися в HBI, а також подаватися безпосередньо розігрітим (HDRI, ~600–700 °C) на сталеплавильний переділ. Midrex передбачає всі три форми продукту – CDRI, HBI та гарячий HDRI (через систему HOTLINK® або конвеєр до ЕДП) [2]. На рисунку 1.1 зображено продукти DRI.



Рисунок 1.1 – Продукти DRI

Типові масштаби: Технологія Midrex є дуже масштабованою. Існують як модулі малої продуктивності ($\sim 0,5$ млн т DRI на рік), так і надпотужні установки. Найбільший діючий модуль Midrex має проектну потужність 2,5 млн т DRI/рік (встановлено, зокрема, в Алжирі на AQS Bellara та у США на Nucor Louisiana) [4]. Як правило, сучасний один модуль Midrex виробляє 0,8–1,6 млн т DRI на рік, а для збільшення продуктивності будують кілька модулів на майданчику [4]. На рисунку 1.2 зображено модуль Midrex потужністю 2,5 млн т/рік.



Рисунок 1.2 - AQS Bellara, Алжир — модуль Midrex потужністю 2,5 млн т/рік.

Енергоспоживання: Процес вирізняється відносно низьким споживанням енергоносіїв на тонну продукції. Природний газ витрачається в межах 2,25–2,42 Гкал на 1 т DRI (низькокалорійна теплота) [3]. Додаткова електроенергія – на приводи компресорів, конвеєри тощо – складає ~ 80 – 105 кВт·год/т DRI [3]. Для порівняння, це еквівалентно ~ 10 – 11 ГДж/т загального енергоспоживання, що близьке до теоретичних меж для відновлення заліза. Витрати кисню в Midrex мінімальні (12–30

Нм³ O₂/т) і вода ~1,5 м³/т [3] – кисень в основному потрібен для спалювання частини газу в риформері.

На рисунку 1.3 зображена принципова блок-схема процесу прямого відновлення заліза Midrex. Залізорудні окатки в шахтній печі відновлюються потоками водню та СО, отриманими шляхом риформінгу природного газу. Відпрацьований газ після скрубера і видалення СО₂ повертається в цикл як відновлювальний газ [2].

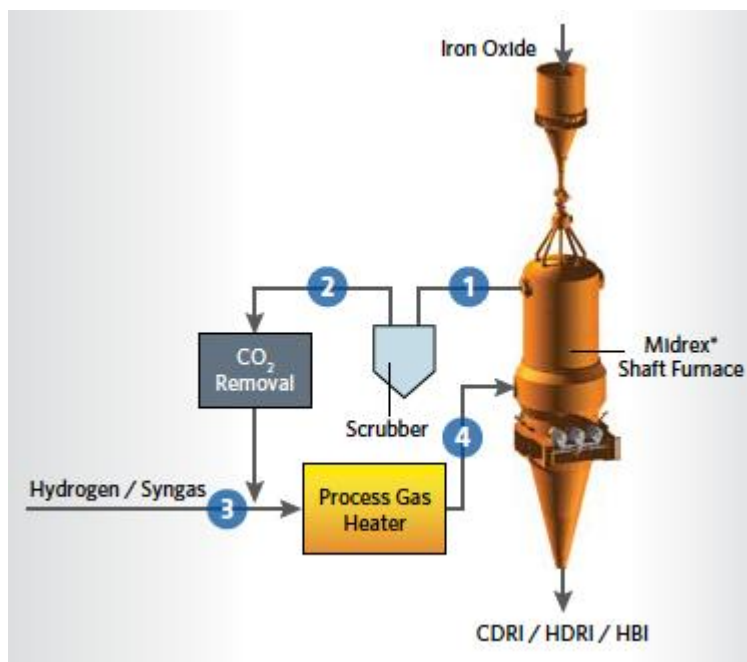


Рисунок 1.3 - Блок-схема процесу прямого відновлення заліза Midrex

Екологічний вплив і декарбонізація

Технологія Midrex спочатку розроблялася як чистіша альтернатива доменному виробництву сталі. Природний газ – значно чистіше паливо, ніж коксівне вугілля, тому при газовому відновленні викиди СО₂ на тону DRI суттєво нижчі, ніж при виплавці чавуну в домні [2]. За

оцінками, повний цикл DRI–EAF дозволяє скоротити викиди парникових газів на 40–60% порівняно з циклом домна–конвертер [1]. Окрім парникових газів, установки Midrex також характеризуються низькими викидами пилу, NO_x і SO_x : процес відповідає стандартам Світового банку з екології, а за потреби може бути дооснащений для дотримання навіть суворіших місцевих нормативів [2]. Система скрубєрів і фільтрів мінімізує запиленість газів, споживання води оптимізоване (близько $1,5 \text{ м}^3/\text{т}$) [3], а шум і вібрації знижені конструктивно.

В контексті декарбонізації сталі Midrex є однією з ключових технологій для переходу на водень як відновник. У базовій схемі Midrex уже зараз ~60–65% відновлювального потенціалу забезпечує водень (той, що міститься в риформованому газі) [5]. Тому поступова заміна природного газу на зелений водень можлива без радикальних змін: процес дозволяє подавати відновлювальний газ із будь-яким співвідношенням $\text{H}_2:\text{CO}$ аж до 100% H_2 [5]. Вже реалізовано кілька пілотних проєктів із використання чистого водню. Наприклад, у Швеції стартап H2 Green Steel будує перший у світі комерційний завод на 100% водні з технологією Midrex (консорціум Midrex і Paul Wurth) – установка продуктивністю 2,1 млн т DRI на рік постачатиме сировину для “зеленої” електросталеплавильні в Будені, скорочуючи викиди CO_2 ~на 95% [6]. У Німеччині компанія thyssenkrupp Steel у 2023 році обрала технологію Midrex Flex для нового воднево-готового ДР-процесу в Дуїсбурзі (модуль 2,5 млн т DRI/рік, введення в 2026, інвестиція ~€1,8 млрд) [2]. Таким чином, Midrex відіграє провідну роль у планах декарбонізації металургії на Заході. Порівняння Midrex і доменного виробництва наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняння Midrex і доменного виробництва

Параметр	Midrex	Доменне виробництво
Тип палива	Природний газ (із можливістю переходу на водень)	Коксівне вугілля
Викиди CO ₂ (DRI–EAF проти доменного циклу)	На 40–60% нижчі	Високі
Викиди пилу, NO _x , SO _x	Низькі, відповідають стандартам Світового банку	Високі
Витрати води	~1,5 м ³ /т	Вищі
Воднева готовність	Так (~60–65% H ₂ у риформованому газі)	Немає водневої готовності
Макс. частка водню у відновлювальному газі	До 100%	0%
Приклади реалізації водневих проєктів	H2 Green Steel (Швеція), thyssenkrupp Steel (Німеччина)	Відсутні
Країни-лідери впровадження Midrex для декарбонізації	Швеція, Німеччина	Переважає у традиційних країнах сталеварного виробництва

Приклади реалізованих установок

Технологія Midrex комерційно застосовується з початку 1970-х років і наразі налічує десятки установок по всьому світу. Географія охоплює Близький Схід (Катар, Саудівська Аравія, ОАЕ, Оман, Алжир тощо), Азію (Індія, Китай, Південна Корея, іранські заводи), Північну Америку, Європу та інші регіони. У 2022 році світове виробництво DRI методом Midrex склало ~73,5 млн тонн (з ~127 млн т загального DRI) [2]. Наведемо кілька показових прикладів діючих підприємств:

ArcelorMittal Hamburg (Німеччина) – перша установка Midrex в Європі, працює з 1971 р. (потужність $\sim 0,5$ млн т DRI на рік). Наразі використовується для тестування водневого відновлення (пілотне впорскування H_2 у 2019 р.).

Emirates Steel (Абу-Дабі, ОАЕ) – найбільший виробник DRI на Близькому Сході. Хоча завод Emirates Steel побудований за технологією Energiron, він вартий згадки через екологічний проект: з 2016 р. тут діє перша у світі промислова система уловлювання CO_2 з DRI (потужністю $\sim 0,8$ млн т CO_2 /рік), газ закачується в нафтові родовища для збільшення видобутку [7]. Цей приклад демонструє можливість інтеграції DRI з технологіями CCUS.

Nucor Steel Louisiana (США) – завод компанії Nucor в м. Конвент, штат Луїзіана, запущений наприкінці 2013 р. Модуль Midrex проектною продуктивністю 2,5 млн т DRI/рік (найбільший на момент запуску). Інвестиції склали $\sim \$750$ млн; це підприємство забезпечує DRI для електросталеплавильних заводів Nucornova-gas.blogspot.com. У серпні 2024 Nucor Louisiana встановив рекорд продуктивності – 330,3 тонни DRI на годину (понад 2,6 млн т/рік в перерахунку) [3].

Cleveland-Cliffs Toledo (США) – новий завод з виробництва НВІ (брикетованого DRI) у Толідо, Огайо, введений у 2020 р. Проектна потужність 1,6 млн т НВІ/рік, технологія Midrex. Загальні капіталовкладення – $\sim \$700$ млн [8]. Установка здатна регулювати вміст вуглецю в НВІ за допомогою запатентованої технології АСТ (Adjustable Carbon Technology) [9].

Voestalpine Texas (США) – завод з виробництва НВІ в м. Корпус-Крісті (штат Техас), запущений 2016 р. потужністю 2,0 млн т/рік

(Midrex). Постачає HBI для австрійських металургійних підприємств Voestalpine, заміщуючи частину доменного чавуну.

Qatar Steel (Катар) – два модулі Midrex сумарною потужністю ~1,6 млн т (запущені в 1978 та 2007 рр.), забезпечують сировиною електропечі Qatar Steel. Ці установки одними з перших використали технологію гарячого транспорту HDRI до ЕДП, підвищивши ефективність плавки.

Metinvest (Україна) – [станом на 2023 р. власних DRI-установок не має], проте Група METINVEST планує будівництво DRI-модулів у рамках “зеленої” трансформації. Зокрема, у співпраці з Danieli опрацьовується проект нового заводу в ЄС. Крім того, Україна – великий постачальник залізорудних окатків, потенційно може стати ключовим постачальником сировини для DRI-металургії Європи [10].

Нові та плановані проекти

У зв'язку зі світовим курсом на декарбонізацію сталі, останніми роками анонсовано багато нових проектів із технологією Midrex, часто з орієнтацією на використання водню:

Іспанія: ArcelorMittal Гіжон. В 2021 р. ArcelorMittal оголосила про інвестиційний план €1 млрд для переходу заводу в Гіжоні на виробництво сталі з низьким CO₂. Центральний елемент – будівництво модуля DRI 2,3 млн т/рік (з можливістю роботи на зеленому водні) та електродугової печі 1,1 млн т [11]. Цей комплекс замінить одну з доменних печей, скоротивши викиди CO₂ на ~4,8 млн т на рік [11]. Запуск DRI й EAF планується до кінця 2025 р. – це буде перший подібний об'єкт в Іспанії.

Швеція: H2 Green Steel (Буден). Як згадано, компанія H2GS буде в Будені повномасштабний завод з випуску “зеленої” сталі. DRI-уста-

новка (Midrex H₂) на 2,1 млн т/рік працюватиме на водні, що вироблятиметься на власному електролізері 800 МВт [2]. DRI використовуватиметься на сусідньому електросталеплавильному комбінаті для випуску 2,5 млн т “зеленої” рулонної сталі на рік [6]. Контракт на постачання технології підписано у 2022 р. [6]. запуск очікується ~2025–2026 рр.

Канада: ArcelorMittal Dofasco (Гамільтон). Планується встановлення Midrex-модуля ~2 млн т/рік на меткомбінаті Dofasco в Онтаріо, з метою заміни доменного виробництва. Проект отримав співфінансування від уряду Канади (до \$400 млн); введення в дію очікується в 2028 р. DRI буде використовуватися в новій ЕДП замість чавуну, що дасть зниження CO₂ ~60%.

Німеччина: SALCOS (Salzgitter). Попри те, що Salzgitter обрала технологію Energiron для свого DRI-проекту (див. далі), інший німецький сталеливарний гігант – thyssenkrupp Steel – зупинив вибір на Midrex. Проект ThyssenKrupp “tkH2Steel” передбачає будівництво у Дуйсбурзі заводу прямого відновлення на 2,5 млн т DRI/рік з гнучкістю по паливу (газ/водень), а також двох конверторів-металізаторів для виплавки чавуну з DRI [2]. Генпідрядником виступає SMS group, а технологія Midrex Flex™ забезпечить можливість використання до 100% водню [10]. Вартість – €1,8 млрд, термін реалізації – до кінця 2026 року.

Україна/ЄС: Metinvest та Danieli. Українська група METINVEST спільно з італійським виробником обладнання Danieli у 2023 р. підписали угоду про реалізацію в Італії великого комплексу з випуску “зеленої” сталі – проект Metinvest Adria (м.Пьомбіно) [10]. Планується збудувати електропічний міні-завод з прокатним станом, розрахований на 2,7 млн т гарячекатаного рулону на рік [10]. Складовою частиною про-

екту стане установка прямого відновлення для забезпечення металізованою сировиною (за деякими даними, потужністю близько 2 млн т DRI). Очікувана вартість – €2,5 млрд [10], запуск – ~2028 р. [10]. Цей завод позиціонується як найсучасніше сталеплавильне виробництво в ЄС з використанням новітніх технологій зниження викидів. Ймовірно, технологію DRI постачатиме Danieli у рамках платформи Energiron (оскільки Danieli є партнером Tenova HYL), однак остаточний вибір не оголошено. Проект важливий і для України, оскільки планується постачати окатки українських ГЗК як сировину [10], інтегруючи таким чином українську залізорудну базу в європейський “зелений” ланцюжок створення вартості.

Техніко-економічні показники Midrex

Технологія Midrex демонструє привабливі економічні показники завдяки високій енергоефективності, великій продуктивності та відносно низьким витратам сировини:

Капітальні інвестиції: орієнтовна вартість будівництва установки Midrex становить ~\$300–500 на тонну річної продуктивності. Наприклад, завод Cliffs Toledo (1,6 млн т) коштував ~\$700 млн [8], а 2,5-мільйонний модуль у Луїзіані – близько \$750 млн. В Європі воднево-орієнтовані проекти виходять дорожче через додаткову інфраструктуру: €1 млрд на 2,3 млн т в Іспанії [11] €1,8 млрд на 2,5 млн т в Німеччині (включно з печами-металізаторами) тощо.

Собівартість DRI: залежить від цін на природний газ/електроенергію та руду. За оцінками аналітиків, при середніх цінах природного газу DRI може коштувати близько \$300 за тонну [12] (без урахування витрат на плавку в ЕДП). Перехід на зелений водень суттєво підвищує

витрати у короткостроковій перспективі, але очікується їх зниження за рахунок здешевлення відновлюваної електроенергії.

Енергоефективність: Загальне споживання енергії ~ 10 ГДж на тонну DRI (в хімічній енергії газу і електриці) відповідає ККД процесу близько 75–80%. У сучасних модифікаціях Midrex (з рекуперацією тепла) вдалося підняти ефективність ще на $\sim 6\%$ вище першого покоління [4]. Так, теплота природного газу на 1 т DRI становить $\sim 2,3$ – $2,5$ Гкал (9,6–10,5 ГДж) [3] а електроенергія – 80–100 кВт·год (0,29–0,36 ГДж). Для порівняння, у доменному процесі сумарні витрати енергії перевищують 17–20 ГДж/т чавуну.

Витрати сировини: Завдяки практично повному відновленню заліза втрати заліза малі. На 1 тонну DRI витрачається $\sim 1,4$ – $1,45$ т окатків [3] (вміст Fe $\sim 67\%$). Вихід заліза з руди перевищує 94–95%. Невеликі втрати Fe йдуть з пилом топових газів та шкалою при охолодженні. Перевагою Midrex є стабільність матеріального потоку в шахті – процес не має “мертвих зон” чи зависань, тому досягається висока і рівномірна якість продукту [4].

Експлуатаційні витрати: Крім сировини та енергоносіїв, до витрат входить обслуговування риформера (каталітичні трубки, заміна каталізатора раз на кілька років тощо) та компресорів. Завдяки відсутності плавлення вогнетривих печі служать дуже довго (випадків повної футеровки шахти за десятиліття не потребувалося) [4]. Практика показує, що надійність установок Midrex дуже висока: на Emirates Steel модуль №2 пропрацював 315 діб поспіль без зупинок (доступність 105% від плану) [5].

Екологічні показники: Викиди CO₂ при роботі на природному газі становлять ~1,1–1,5 т CO₂ на тонну DRI (включно із спожитою електрикою на ЕДП), що приблизно вдвічі менше доменного маршруту [1]. При повному переході на водень процес стає майже безвуглецевим (викиди <0,1 т CO₂/т стали, в основному від електрики). Викиди пилу, NO_x, SO_x невеликі і відповідають нормам (наприклад, пил <5 мг/нм³ після скрубера). Водоспоживання – лише на охолодження газів і продукції, частково замкнуте в циклі. Усі економічні показники наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристика процесу

Показник	Економічне значення
Капітальні витрати на будівництво	\$300–500 за 1 т/рік продуктивності — це означає, що для заводу на 2 млн т/рік потрібно \$600–1000 млн. В Європі дорожче через водневу інфраструктуру (до €1,8 млрд)
Фактична вартість об'єктів	- Cliffs Toledo (1,6 млн т): \$700 млн - Nucor Louisiana (2,5 млн т): \$750 млн - ArcelorMittal Іспанія (2,3 млн т): \$1 млрд
Собівартість 1 тонни DRI	~\$300 при природному газі — це вдвічі дешевше, ніж виплавка чавуну з урахуванням коксового вугілля
Витрати енергії	~10 ГДж/т — еквівалентно близько \$30–40 при сучасних цінах на газ і електроенергію
Споживання природного газу	2,3–2,5 тис м ³ на 1 т продукції — один із найнижчих показників серед DRI-технологій
Споживання електроенергії	80–100 кВт·год/т (\$10–12 при ціні \$0.12/кВт·год)
Економія на сировині	1,4–1,5 окатанів на 1 т DRI — стабільна якість з мінімальними втратами заліза
Обслуговування та ремонт	Низькі витрати завдяки довговічності футерівки (без заміन десятиліттями)
Викиди CO ₂	~1,1–1,5 т CO ₂ /т — на 50% менше, ніж доменна піч. Це знижує вартість викидів у країнах з вуглецевим податком
Водоспоживання	~1,5 м ³ /т — не потребує додаткового водозабезпечення, економить витрати на охолодження
Окупність та ефективність	ККД 75–80%, висока надійність (до 315 діб без зупинок), окупність — 5–7 років за сприятливих умов

1.3. Технологія Energiron HYL

Energiron – це сучасна марка технології прямого відновлення, спільно розроблена компаніями Tenova HYL (Італія/Мексика) та Danieli. Історично вона бере початок від процесу HYL, розробленого мексиканською компанією Hylsa ще в 1957 році. Протягом десятиліть технологія HYL еволюціонувала через декілька поколінь (HYL I, II, III), а з початку 2000-х, після об'єднання зусиль з Danieli, отримала брендове ім'я Energiron. Сьогодні Energiron є другою за поширеністю технологією DRI після Midrex і забезпечує близько 17% світового виробництва прямого заліза [1]. Особливістю процесів сімейства HYL є робота при підвищеному тиску та можливість виробництва DRI з підвищеним вмістом вуглецю.

Технічні характеристики та процес HYL/Energiron

Шахтна піч під тиском: На відміну від Midrex, класичні установки HYL працюють при високому тиску в реакторі – типовий тиск ~5–6 атм (≈ 6 бар) [5]. Шахтна піч має товстіші стінки і обладнана газонагнітачами для створення тиску. Підвищення тиску дає значні переваги: вища концентрація відновних газів підвищує швидкість реакцій та продуктивність печі (до ~10 т DRI/год на м² перетину) [5], а також сприяє кращій рекуперації топових газів і меншим втратам заліза з пилом [5]. Як наслідок, процес HYL споживає дещо менше руди – $\approx 1,35$ – $1,40$ т окатків на 1 т DRI (проти ~1,45 т у Midrex) [5].

Джерела відновного газу: Класична технологія HYL (покоління I–III), подібно до Midrex, використовує риформер для виробництва синтез-газу з природного газу. Основним відновником є суміш водню (H₂) і монооксиду вуглецю (CO), отримана в результаті риформінгу. Класичну схему зображено на рисунку 1.4.

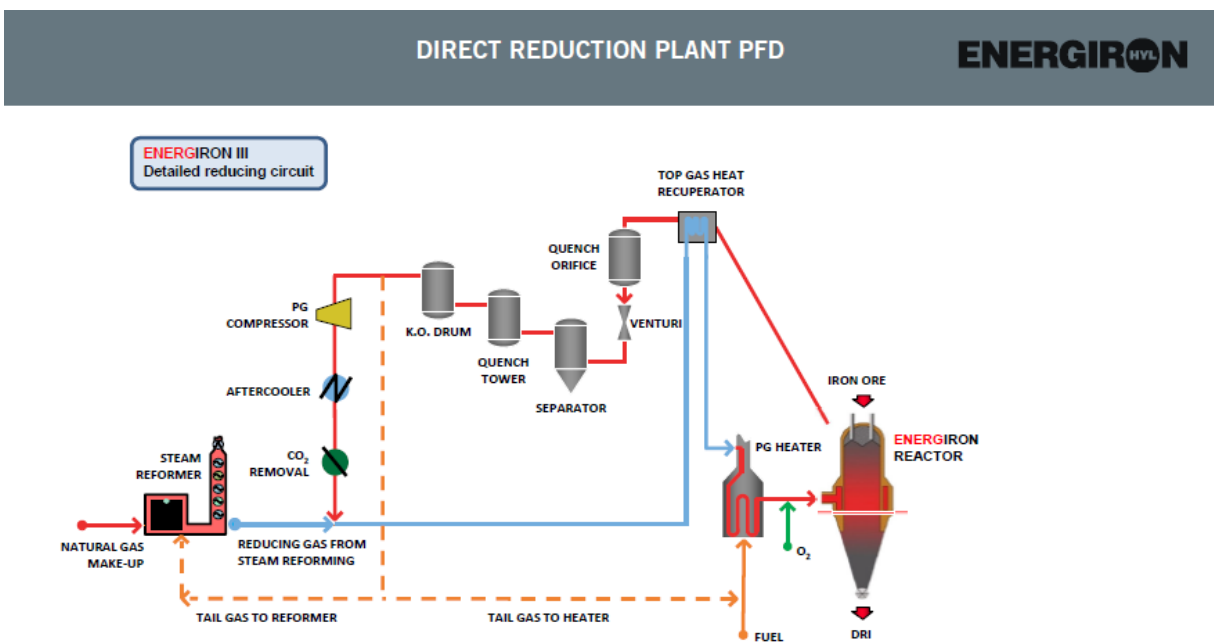


Рисунок 1.4 - Схема ENERGIROn HYL (покоління III)

Процес дуже гнучкий щодо джерел газу: можуть використовуватися суміш природного газу і водню в будь-якій пропорції, водень (100%), синтез-газ від газифікації вугілля або нафтового коксу, коксовий газ тощо [13]. Ця гнучкість – сильна сторона Energiron: схема однакова для різних газів, оператор може переключатися між джерелами або комбінувати їх залежно від наявності та ціни палива.

Відновлення та карбонізація: Завдяки високому тиску і оригінальній схемі подачі газів, процес Energiron досягає високого ступеня металізації (~94–95%). DRI, що випускається, має контрольований вміст вуглецю в широкому діапазоні – від ~1,5% до 4–5% C [14]. Більш високий вміст вуглецю (наприклад 3–4%) отримується введенням природного газу безпосередньо в зону відновлення для ендотермічного розкладання CH_4 з осадженням вуглецю на залізо (карбонізація). Такий висо-

ковуглецевий DRI є фірмовим продуктом Energiron: він хімічно стабільніший при зберіганні та транспортуванні (менше окиснюється), що дозволяє відвантажувати його на експорт навіть у вигляді холодного DRI без обов'язкового брикетування [14]. Високий вуглець також сприяє економії електроенергії в електропечі (за рахунок теплоти окиснення С) [14].

Форми продукції: Як і Midrex, установка Energiron може працювати в різних режимах – на випуск холодного DRI, гарячого DRI або брикетованого HBI. Для подачі гарячого продукту безпосередньо в ЕДП розроблена пневмотранспортна система HYTEMP®, що переміщує DRI при $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ по трубопроводу від шахти до електропечі під тиском інертного газу [14]. Цю технологію вперше було впроваджено на мексиканських заводах Hylsa і успішно застосовано в ОАЕ, Єгипті та ін. Схему з пневмотранспортною системою зображено на рисунку 5.

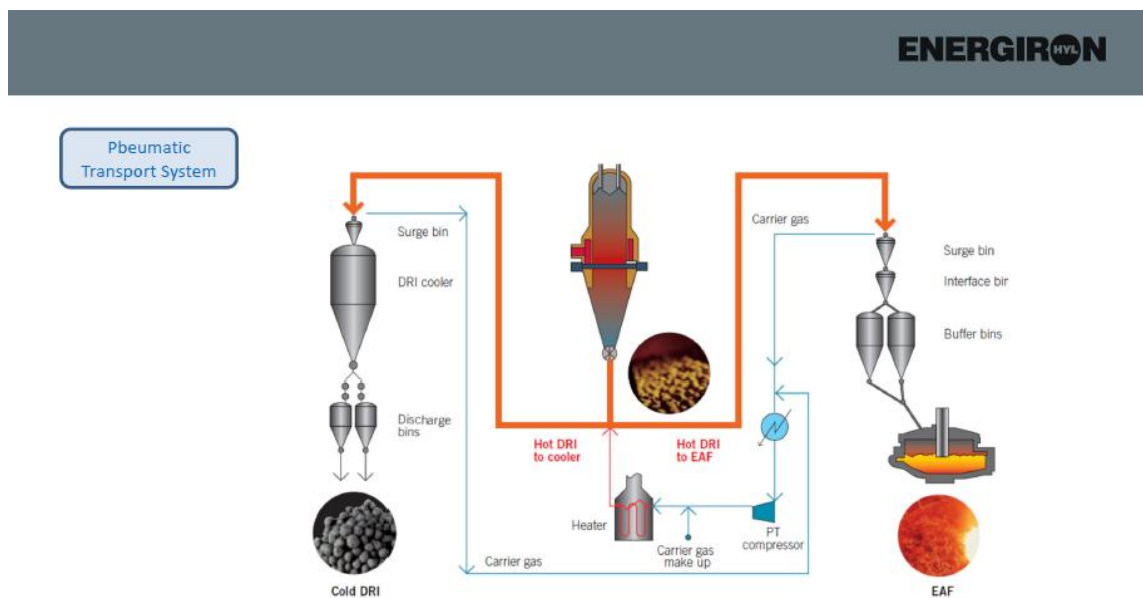


Рисунок 1.5 - Пневмотранспортна система HYTEMP®, що переміщує DRI за температури $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Енергетичні витрати: Завдяки ефективному використанню газу в процесі (інтегрований риформінг, рекуперація тепла) технологія Energiron має дуже подібні показники до Midrex. Споживання природного газу складає $\approx 2,3\text{--}2,5$ Гкал/т DRI [5] (в тому числі на обігрів газу). Електроенергія – лише 60–80 кВт·год/т [5] завдяки тому, що компресори працюють при вищому вхідному тиску і загальний газопотік менший (через високий тиск менше об'ємів). Щоправда, процес потребує додаткового кисню для вбудованого риформінгу: $\approx 24\text{--}26$ Нм³ O₂ на 1 т DRI у режимі ZR [3]. Витрати води – $\sim 1,4$ м³/т.

Продуктивність: Робота під тиском і висока температура газу (>1000 °С у відновній зоні) дають можливість піднімати продуктивність одиничного модуля. Вже в 1998 р. на дослідній установці HYL ZR в Монтеррей досягнуто продуктивності 0,75 млн т/рік з однієї невеликої печі [5]. Сучасні промислові модулі Energiron стандартно розраховуються на 1,6–2,5 млн т на рік. Першим крупнотоннажним став завод Suez Steel в Єгипті – установка Energiron ZR потужністю 2,0 млн т/рік (введена у 2011 р.) [14]. Наразі рекордом є модуль Nucor Louisiana на 2,5 млн т (контракт Tenova HYL 2011 р.) nova-gas.blogspot.com, хоча фактично Nucor зрештою реалізував проект на базі Midrex. Втім, потенціал технології підтверджено – у 2019 р. Algerian Qatari Steel ввела дві шахти Midrex по 2,5 млн т [4], і Energiron має аналогічні можливості масштабування.

Контроль процесу: Шахтна піч Energiron обладнується численними датчиками тиску і температур, система керування автоматично підтримує баланс подачі газів і кисню. Важливо, що завдяки каталітичному ефекту заліза всередині печі частина природного газу самореформується (розкладається) у відновні гази без витрат палива [13]. Це

підвищує загальну теплову ефективність. За рахунок вищої робочої температури DRI виходить гарячішим (~700 °C проти ~650 °C у Midrex), що покращує роботу брекетувальників або пряму плавку в ЕДП. Загалом, гнучкість – ключова характеристика Energiron: виробник може вибирати різні режими за вмістом вуглецю, температурою та формою випуску продукції під свої потреби [14].

Екологічні аспекти та H₂-готовність

Як і Midrex, технологія Energiron орієнтована на чистіше, газове відновлення заліза. Природний газ замість вугілля означає значно менше утворення CO₂, SO₂ та пилу. DRI-маршрут на базі Energiron має вуглецевий слід приблизно 1,4–1,6 т CO₂ на тонну сталі, що набагато нижче доменного (~2,3–2,5 т) [1]. Важливо, що процес спочатку розроблений з інтегрованою технологією уловлювання CO₂. У схемі Energiron передбачено установку селективного поглинання CO₂ з циркуляційного газу (amine scrubber), яка при високому тиску газу працює дуже ефективно [13]. За потреби можна вилучати до 90% CO₂ з відпрацьованого газу, отримуючи майже чистий потік CO₂ для стиснення і використання. За даними досліджень, базова схема Energiron зі 100% вловлюванням CO₂ дозволяє знизити викиди процесу до всього ~156 кг CO₂ на тонну DRI [7]. (порівняно з ~390 кг без уловлювання). Вилучений CO₂ може бути проданий як товарний продукт (для виробництва соди, сухого льоду, в харчовій промисловості, для закачування в родовища тощо) [7]. Практичний приклад – завод Emirates Steel (OAE), де з 2016 р. працює зв'язка двох Energiron-модулів із установкою CCUS: щорічно 0,8 млн т CO₂ вилучається з газів DRI та використовується

компанією ADNOC для підвищення нафтовидобутку [7]. Схему уловлювання та видалення CO₂ зображено на рисунку 1.6.

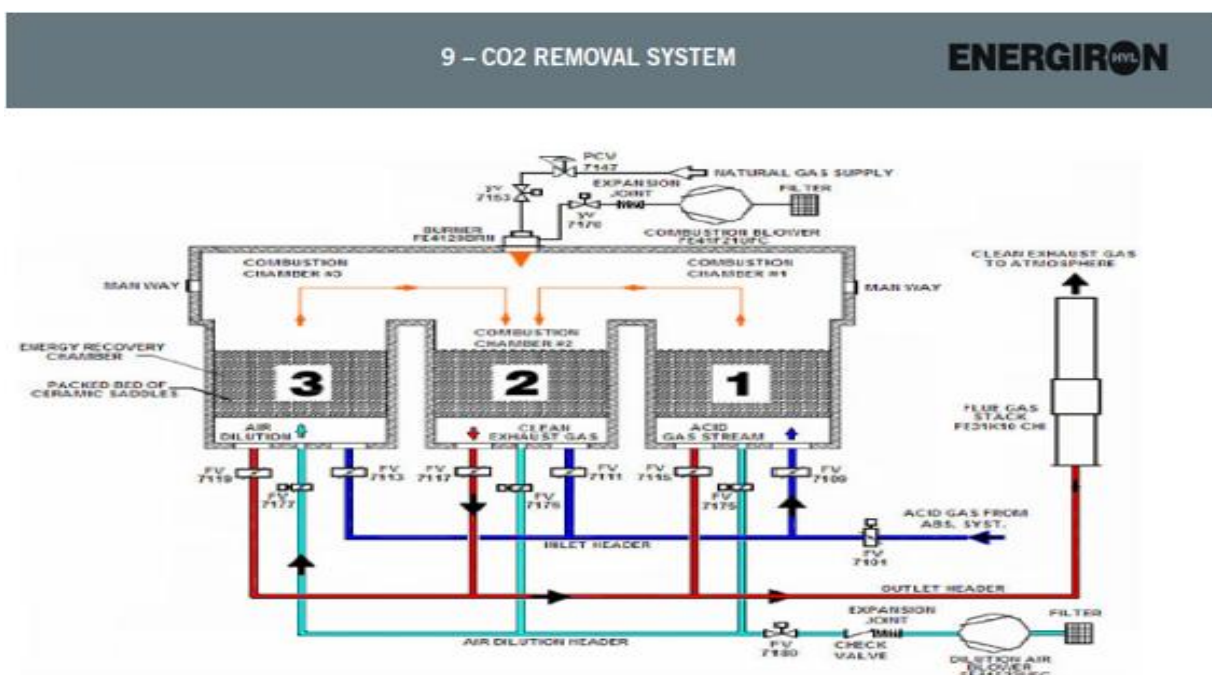


Рисунок 1.6 - Схема уловлювання та видалення CO₂

Технологія Energiron з самого початку розрахована на високий вміст водню. У типових умовах частка H₂ в відновлювальному газі сягає 60–75%, решта – CO [5]. Тому перехід на чистий водень здійснюється без суттєвих змін апаратури – достатньо замінити природний газ на подачу H₂. Як зазначає Тепова, “водень завжди був основним відновником у цій технології”, і Energiron може працювати на 100% H₂ з тією ж схемою обладнання [5]. При цьому кінетика відновлення заліза пришвидшується до 5 разів завдяки активності H₂ [5], що потенційно збільшує продуктивність або зменшує температуру процесу. Уже існують проекти впровадження водню: так, Salzgitter Flachstahl (Німеччина) у травні 2023 р. обрала Energiron для нового водневоорієнтованого ком-

плексу – модуль 2,1 млн т DRI/рік буде реалізовано до ~2026 р. в рамках програми SALCOS [5]. На цьому заводі спочатку використовуватимуть суміш природного газу з воднем, з поступовим нарощуванням частки H_2 до 100%. В самому процесі Energiron водень може подаватися як безпосередньо в реактор, так і вироблятися частково з природного газу в результаті ін-ситу риформінгу (при варіанті ZR). Таким чином, технологія повністю сумісна з концепцією “зеленої” сталі. Зокрема, Tenova і Danieli спільно з Emirates Steel наразі розробляють електронагрівач газу для заміни традиційного газового нагрівача – це дозволить використовувати чистий водень без спалювання природного газу навіть на стадії підігріву [5].

Реалізовані установки Energiron (HYL)

Технологія HYL має довгу історію: перший промисловий завод запущено ще 1957 р. у Монтеррей (Мексика). У 1980–90-х роках HYL-модулі працювали в Мексиці, Венесуелі, Індії, Малайзії тощо. Багато з них були відносно невеликої потужності (0,3–0,5 млн т) і вимагали брикетування продукції (через низький вміст вуглецю DRI тодішніх поколінь). Сучасна технологія Energiron (покоління ZR) зробила ривок у продуктивності та стабільності продукту. Нижче наведено приклади діючих підприємств на базі Energiron/HYL:

Ternium (Hylsa) Монтеррей (Мексика) – полігон, де відпрацьовувалися всі покоління HYL. У 1998 р. тут була запущена перша дослідна установка HYL ZR (без риформера) потужністю ~0,75 млн т/рік [5], яка успішно випускала DRI з 3,5–4% вуглецю [5]. У 2001 р. доданий ще один модуль (HYL 3M5) з поліпшеним енергобалансом [5]. Ці агрегати стали прообразом комерційних масштабних ZR. Заводи Hylsa поставляли DRI на електропечі, а надлишок брикетувався в HBI для продажу.

Suez Steel (Ель-Айн ас-Сохна, Єгипет) – перший у світі повномасштабний модуль Energiron ZR. Запущений в 2011 році, проектна продуктивність 1,95 млн т DRI/рік (металізація 94%, C ~2,5–3%). Цей реактор показав успішну роботу і підтвердив, що схема без риформера може ефективно працювати у промисловому масштабі [5]. Завод виробляє гарячий DRI, який частково брикетується в HBI для експорту.

Emirates Steel (Абу-Дабі, ОАЕ) – два паралельні модулі Energiron (HYL) введені в 2009 і 2011 рр., кожен номіналом 1,6 млн т/рік [5]. Розраховані на випуск гарячого DRI (HDRI) з подачею по системі HYTEMP у сусідні електропечі. Emirates Steel славиться стабільною роботою: 2016–2017 рр. модуль DR-2 виробив 2,0 млн тонн за рік при безперервній роботі 315 діб [5] – рекордні показники. Як вже зазначалося, тут діє і CCUS-система для уловлювання CO₂. Цей завод демонструє надійність та екологічність технології Energiron в масштабах національного комбінату.

JSW Steel (Долві, Індія) – в 2014 р. компанія JSW запустила установку прямого відновлення Energiron з технологією HYTEMP® для гарячої подачі DRI на ЕДП. Потужність ~1,5 млн т/рік. Це один з небагатьох газових DRI-заводів в Індії (де домінують вугільні процеси). Досвід JSW показав ефективність застосування Energiron навіть за умов неідеального природного газу (використовується суміш з коксовим газом).

HBIS & Danieli (Китай) – у 2021 р. китайський виробник HBIS оголосив про будівництво першої в Китаї водневої DRI-установки на базі Energiron. Проект у місті Чжанцзяган (HBIS Xuansteel) передбачає модуль 1,2 млн т/рік з подальшою електроплавкою, з акцентом на максимально низькі викиди CO₂. Введення очікується 2025 р. Це частина стратегії Китаю по декарбонізації металургії.

Tosyali Algerie (Алжир) – хоча DRI-завод Tosyali (спільний з Danieli) фактично базується на процесі Midrex, варто згадати його як приклад успішного нового виробництва в Північній Африці: 2 модулі по 2,5 млн т (введені 2021–22 рр.) забезпечують DRI для електросталеплавильного комплексу Tosyali. Це закріплює позицію регіону MENA як лідера зростання виробництва прямого заліза.

МЕТІНВЕСТ/Danieli – в контексті України проекти Групи МЕТІНВЕСТ наразі на стадії планування нові проекти щодо Metinvest Adria в Італії. Ймовірно, у разі реалізації, там буде застосовано технологію Energiron (як спільну розробку Danieli-Tenova). В Україні ж поки що жодного діючого виробництва DRI немає, але є всі передумови до його запуску: багаті ресурси залізної руди (близько 5 млрд тонн магнетитових руд зосереджено в Україні [3]) та інтерес металургійних компаній до “зеленої” перебудови після 2022 р.

1.4.Energiron ZR: «Zero Reformer» – сучасна схема

У новітніх реалізаціях технології Energiron застосовується конфігурація ZR (Zero Reformer) – процес без зовнішнього риформера. Ця схема була вперше впроваджена на установці HYL-IV в 1998 році і нині використовується у більшості нових проектів Tenova. Ключові особливості Energiron ZR такі:

Відмова від риформера: Замість великого окремого риформера (печі з десятками труб з каталізатором) процес ZR генерує відновлювальний газ прямо в шахті. Досягається це шляхом впорскування невеликої кількості чистого кисню безпосередньо в піч (в нижню зону) разом із подачею природного газу [13]. Кисень частково спалює природ-

ний газ, піднімаючи температуру газового потоку і утворюючи необхідний H_2/CO . Додатково, металічне залізо, накопичене в нижній частині шахти, діє як каталізатор, сприяючи ендотермічному риформінгу метану ($CH_4 \rightarrow CO + H_2$) прямо на своїй поверхні [13]. Таким чином, усі відновні гази генеруються в реакторі, а зовнішня установка риформінгу не потрібна [13].

Спрощена компоновка: Схема ZR простіша – немає громіздкого риформера, менше трубопроводів та пальників. Це знижує капітальні витрати та витрати на обслуговування (менше обладнання – менше ремонтів) [13]. За оцінками Tenova, інвестиції в установку ZR на 5–8% нижчі, ніж у еквівалентну з риформером, при тих самих показниках продуктивності. Операційні витрати теж менші через економію природного газу (частину тепла дає горіння кисню). Схему ZR без риформера зображено на рисунку 1.7.

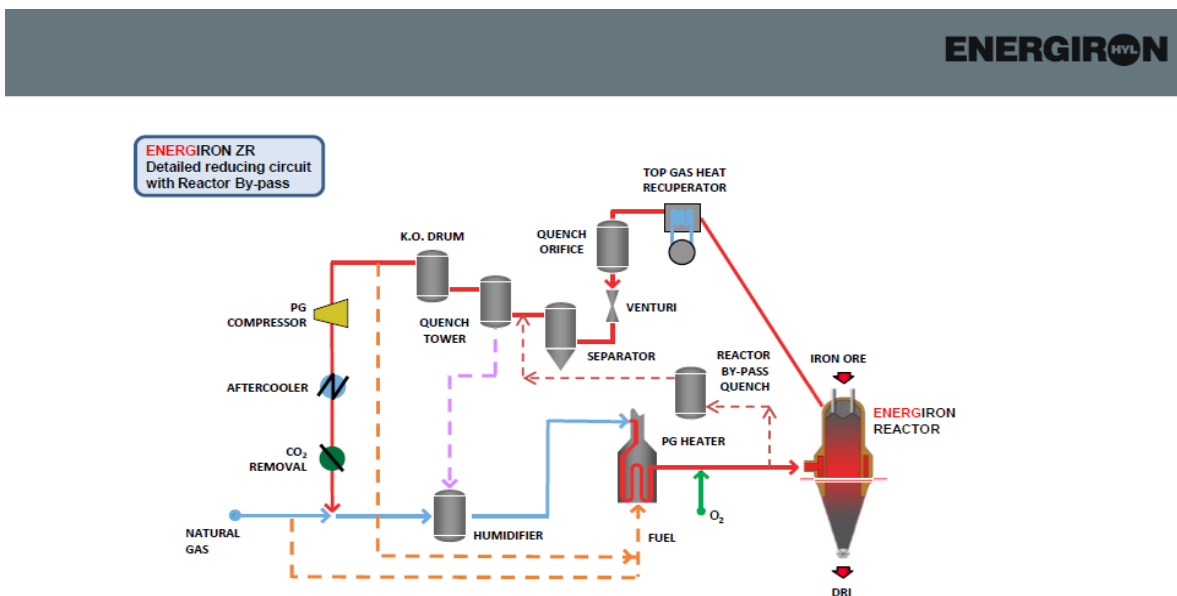


Рисунок 1.7 - Схема ZR без риформера

Висока якість DRI: ZR-схема дозволяє досягати високого вуглецю в DRI (3–4%) без ризику відкладення сажі у трубах риформера (оскільки риформера немає). Навпаки, частина вуглецю осідає на продукті, підвищуючи його стабільність [5]. Отримуваний DRI з вуглецем 3–4% настільки стійкий до окиснення, що його можна транспортувати в далекі моря без брикетування [13], на відміну від “звичайного” DRI. Це усуває потребу в дорогому брикетуванні для продажу – ще одна економія.

Інтегрований CO₂-збір: Як зазначалося, ZR конфігурація передбачає селективне видалення CO₂. Високий тиск процесу підвищує парціальний тиск CO₂ у топових газах, що робить поглинання аміном дуже ефективним і енергозберігаючим [13]. Наприклад, на Emirates Steel застосовано саме ZR з амінскруберами – кожен модуль вилучає ~0,4 млн т CO₂/рік з газу. Це дозволяє підприємству сертифікувати частину продукції як знижено-вуглецеву і продавати CO₂.

Гнучкість за джерелами газу: У базовій схемі ZR використовує природний газ і кисень. Але при наявності дешевшого водню чи синтетичного газу схема легко адаптується. За потреби, модуль ZR можна обладнати риформером – така універсальність закладена за дизайном: “під тією ж схемою Energiron можна використовувати і традиційний риформер, якщо це доцільно” [13]. Також можна спалювати альтернативні паливні гази в печі (наприклад, коксовий газ) чи подавати їх у суміші.

Приклади впровадження ZR: Майже всі нові заводи Tenova – це схема Zero Reformer. Крім вищезгаданих Suez Steel і Emirates Steel, технологію ZR мають заводи Ezz Steel (Єгипет, 1,9 млн т), ESI (Катар, 2010 р., 0,75 млн т), Jindal Shadeed (Оман, 2009 р., 1,5 млн т, гібридна

схема з риформером) тощо. У Мексиці на Ternium з 2009 р. працює установка Energiron 5M – демонстратор з подвійною подачею газу: з риформера і прямим природним газом, що дозволило відшліфувати алгоритми керування процесом ZR. Сучасні підприємства Energiron ZR досягли значної надійності: середній коефіцієнт використання потужності перевищує 85–90%, з окремими рекордами ~105% (як в Emirates Steel) [5].

Розвиток ZR у майбутньому: Tenova і Danieli інвестують в подальшу оптимізацію процесу. Зокрема, розробляються електропідігрівачі газу для повного виключення спалювання вуглеводнів (для 100% H₂ режиму) [5]. Також досліджується можливість роботи шахти при ще вищому тиску (7–8 бар) для подальшого зниження енергоспоживання [3]. Очікується, що технологія Energiron ZR, як одна з найбільш гнучких і екологічних, займатиме важливе місце в переході на “зелений” водень і досягненні вуглецевої нейтральності сталі.

Техніко-економічні показники Energiron

З економічної точки зору, процес Energiron пропонує аналогічний рівень ефективності, що й Midrex, із деякими відмінностями через роботу під тиском:

Інвестиції: За оцінками Tenova, “загальні інвестиції для заводу за схемою ZR нижчі, ніж для традиційного DR заводу з риформером” [13]. Вартість конкретних проектів різниться. Наприклад, згаданий проект Salzgitter (2,1 млн т) оцінюється в €0,7 млрд (лише DRI-частина), а італійський Metinvest Adria (2 млн т DRI + ЕДП + прокат) – €2,5 млрд [10]. В цілому можна сказати, що капітальні витрати Energiron аналогічні Midrex при рівних масштабах. Перевага – відсутність витрат на риформер (що економить ~\$50 млн на 1 млн т/рік потужності).

Витрати газу: Природний газ $\sim 2,3\text{--}2,5$ Гкал/т DRI [5]. – на тому ж рівні, що і Midrex. За рахунок інтенсивнішого внутрішнього риформінгу, чисте споживання може бути навіть трохи менше (наприклад, $2,23$ Гкал/т у режимі з високим H_2/CO) [3]. Якщо ж врахувати додатковий природний газ для нагрівачів та ін., сумарне споживання близьке до $2,7\text{--}2,8$ Гкал/т (включно з паливом на нагрів, що для Midrex вже враховано у $2,4$ Гкал).

Електроенергія: Через більші компресори (високий тиск) може скласти в теорії більше, але на практиці діапазон споживання – $50\text{--}80$ кВт·год/т DRI [3]. За рахунок високого тиску потреба в об'ємі газу менша, і основне електроспоживання – це циркуляційний компресор. Для порівняння, у Midrex $\sim 80\text{--}105$ кВт·год/т. Таким чином, Energiron дещо економніший по електриці.

Кисень: Суттєва стаття витрат для ZR – технічний кисень ~ 25 Nm^3 на тонну [3]. Це додаткові $\sim 10\text{--}15$ m^3 газу на 1 т DRI для крекінгу метану. Вартість кисню залежить від місця (може вироблятися на власній адсорбційній установці). При високих цінах на кисень іноді йдуть на компроміс: працюють в напів-ZR режимі (з меншим впорском O_2 і збереженням маленького риформера).

Витрати руди: Як згадано, $\approx 1,35$ т окатків на 1 т DRI [3] – трохи менше, ніж Midrex (економія $\sim 0,05\text{--}0,1$ т Fe_2O_3 на тонні продукту). Економія досягається завдяки меншим втратам заліза з пилом. В топовому газі Energiron виноситься $<1\%$ заліза (тонкодисперсний оксид), який уловлюється системою очищення.

Собівартість: Пряме відновлення за схемою Energiron/HYL має схожі витрати, що й Midrex. Тепова заявляє про “найнижчу собівартість

у галузі” завдяки високому тиску та ефективності [5]. Зокрема, при виробництві DRI 94% Fe, 3,5% C при 700°C загальні витрати енергії становлять 2,30 Гкал природного газу + 60–80 кВт·год електроенергії на тонну [5] – це один із найкращих показників серед усіх технологій. Операційні витрати на матеріали (окиснювачі, каталізатори) у ZR мінімальні – немає ні каталізатора риформера, ні засипних матеріалів.

Екологічні витрати: Якщо підприємство інвестує в установку уловлювання CO₂, це дає можливість монетизувати вуглець. У країнах з податком на CO₂ технологія Energiron може економити ~\$50 на тонні сталі тільки за рахунок скорочення викидів. Проданий CO₂ (наприклад, 0,5 т на тонну DRI) може принести додатковий дохід ~\$20–30, частково компенсуючи витрати на амінову установку. Сама ж установка поглинання CO₂ споживає ~1,5–2,0 ГДж тепла на 1 т DRI (на регенерацію розчину аміну) – цю теплоту відбирають з відхідних газів, тобто додаткового палива не треба.

Актуальність переходу металургійної галузі України до низьковуглецевої моделі підтверджується сучасними науковими дослідженнями, в яких підкреслюється важливість системного управління викидами, впровадження технологій прямого відновлення заліза та використання інструментів екологічного менеджменту. Зокрема, у власній розробці [43] відзначено, що одним із ключових напрямів досягнення вуглецевої нейтральності є інтеграція цифрових рішень, ESG-підходів та стандартів ISO 14001 у стратегічне управління металургійним підприємством. Це повною мірою узгоджується з цілями модернізації виробництва на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» і підкреслює необхідність поєднання технологічного оновлення із сучасною моделлю управління впливом на довкілля.

Соціально-економічний ефект: Впровадження DRI-технологій сприяє диверсифікації енергозалежності: замість коксівного вугілля використовується природний газ або водень, що особливо актуально для країн з ресурсами газу або планами розвитку ВДЕ (відновлюваної електроенергії). Для України актуальним є використання власного природного газу або “зеленого” водню (у перспективі) для заміщення імпортованого коксу та зменшення викидів від застарілих домен. За підрахунками аналітиків, Україна теоретично може постачати до 20–25 млн т окатків щорічно для європейських DRI-проектів, що становитиме ~14% глобального попиту на DRI-сировину до 2030 р. [10]. Таким чином, розвиток технологій прямого відновлення відкриває нові можливості для металургії України та світу – підвищити ефективність виробництва сталі і водночас зробити цей процес більш екологічно сталим. У таблиці 1.3 наведено порівняння конфігурацій процесу. У таблиці № 1.4 наведено порівняння якості та контролю DRI. У таблиці № 1.5 наведено порівняння операційних характеристик.

Вибір HBI як форми металізованої сировини

Враховуючи велику питому площу поверхні, прямиє відновлене залізо (DRI) є схильним до повторного окиснення при контакті з водою або киснем. Оскільки реакція окиснення є екзотермічною, вона супроводжується виділенням тепла, що створює додаткові ризики під час зберігання та транспортування.

Таблиця 1.3 - Порівняння конфігурацій процесу ENERGIRON III та ENERGIRON ZR

Конфігурація процесу	ENERGIRON III	ENERGIRON ZR
Джерело відновного газу	Зовнішній природний газ / паровий риформер	Природний газ подається безпосередньо в реактор. Риформінг відбувається всередині шахти.
Енергоспоживання (типове для Cold DRI)	Оптимізація споживання енергії: - Природний газ: 2,60 Гкал/т - Електроенергія: 25 кВт·год/т - Кисень: 0–15 Нм ³ /т	Оптимізація споживання природного газу: - Природний газ: 2,40 Гкал/т - Електроенергія: 80 кВт·год/т - Кисень: 50–60 Нм ³ /т
Цикл відновного газу	- Шахта DR - Теплообмінник топазу - Система очищення - Компресор процесного газу - Система абсорбції CO ₂ - Нагрівач процесного газу - Ін'єкція кисню (опціонально)	- Шахта DR - Теплообмінник топазу - Система очищення - Компресор процесного газу - Система абсорбції CO ₂ - Золоуловлювач - Нагрівач процесного газу - Ін'єкція кисню
Секція риформера	- Установа десульфуризації - Радіаційний та конвекційний відділи - Система парогенерації - Установа підготовки живильної води	Відсутня

Таблиця 1.4 - Порівняння якості та контролю DRI для ENERGIION III та ENERGIION ZR

Конфігурація процесу	ENERGIION III	ENERGIION ZR
Якість DRI	Металізація: $\geq 94\%$ Вуглець: до 2,5% (без подачі кисню), до 3,3% (з подачею кисню)	Металізація: $\geq 94\%$ Вуглець: до 4,5% (більше хімічної енергії для ЕДП)
Контроль якості DRI	Металізація та вуглець контролюються незалежно. Вуглець регулюється подачею природного газу до реактора.	Металізація та вуглець контролюються незалежно. Вуглець регулюється вмістом води та концентрацією CH_4 у відновлювальному газі (через зололовувач).
Тип продукції	- Холодний DRI - Гарячий DRI - HBI	- Холодний DRI - Гарячий DRI - HBI

Таблиця 1.5 - Порівняння операційних характеристик ENERGIION III та ENERGIION ZR

Конфігурація процесу	ENERGIION III	ENERGIION ZR
Гнучкість роботи	<ul style="list-style-type: none"> - Наявність риформера ускладнює експлуатацію. - При зупинці секції відновлення риформер продовжує працювати, що призводить до витрат енергії. - Повторний запуск із гарячого стану зазвичай призводить до утворення низькометалізованого матеріалу. - Запуск із холодного стану займає близько 72 годин. 	<ul style="list-style-type: none"> - Установка простіша в експлуатації. - При зупинці секції відновлення енергія не споживається. - Повторний запуск із гарячого стану не створює низькометалізованого матеріалу. - Запуск із холодного стану займає близько 36 годин.
ОРЕХ (операційні витрати)	Вища витрата енергії та більші витрати на обслуговування через риформер (вищі ОРЕХ).	Найоптимізованіша схема енергоспоживання з мінімальними експлуатаційними та обслуговуючими витратами.
CAPEX (капітальні витрати)	На 15–20% вищі.	-
Екологічний вплив	-	Низькі викиди.

Hot Briquetted Iron (HBI) являє собою ущільнену форму DRI, отриману шляхом стискання при температурі 650 °C або вище. Густина готового продукту перевищує 5,0 г/см³. Процес гарячого брикетування

дозволяє закрити внутрішні пори, зменшити доступну поверхню, підвищити видиму густину й покращити теплопровідність. Сукупність цих властивостей значно знижує реактивність DRI.

Завдяки своїй стабільності HBI є оптимальним варіантом для довготривалого зберігання та морських перевезень. Саме тому ця форма DRI є найбільш прийнятною для комерційного використання на глобальному ринку металізованої сировини.

Крім того, HBI вважається найкращим вибором для використання в доменних печах. Низька питома площа поверхні зменшує ймовірність окиснення у верхній зоні домни, а висока механічна міцність забезпечує стабільність твердого потоку, компенсуючи потребу у підвищеній кількості коксу. У таблиці 1.6 наведено порівняльну характеристику брикетованого заліза (HBI) та прямовідновленого заліза (DRI) за показниками стабільності, міцності та умов використання. У таблиці 1.7 подано порівняльну характеристику DRI та HBI з огляду на конструктивні особливості установок, собівартість виробництва та логістичні витрати. У таблиці 1.8 наведено порівняння HBI та DRI щодо їхньої поведінки під час плавлення в електродуговій печі (ЕДП), а також втрат під час транспортування.

1.5. Сучасні електродугові печі (EAF) загального призначення

Принцип роботи електродугової печі

Електродугова піч (дугова піч, electric arc furnace, EAF) — це промислова електрична плавильна установка, в якій метали розплавляються за рахунок тепла електричної дуги [15].

Таблиця. 1.6 - Порівняльна характеристика брикетованого заліза (HBI) та прямовідновленого заліза (DRI) за показниками стабільності, міцності та умов використання.

Показник	DRI	HBI
Стабільність продукту щодо повторного окислення	Поверхня DRI становить близько 1 м ² /г через високу пористість (60%). DRI, що виробляється на установках ENERGIRON ZR, значно стабільніший за звичайний DRI, але все ще поступається HBI через високий вміст Fe ₃ C.	За густини 5 г/см ³ пористість HBI становить близько 15%. Завдяки малій відкритій поверхні HBI є продуктом з найвищою стабільністю.
Деградація при транспортуванні та обробці	Більше утворення дрібних фракцій та втрат при транспортуванні порівняно з HBI.	HBI є продуктом DRI з найвищою механічною міцністю. Мінімальні втрати при обробці.
Спеціальні вимоги до зберігання/обробки споживачем	Традиційно DRI використовують на міні-заводах, де передбачена відповідна інфраструктура для зберігання й подачі. DRI можна подавати в бункер ЕДП порційно (до 20%) або безперервно (до 100%).	HBI може використовуватись на будь-якому заводі без спеціальних змін інфраструктури, подібно до металобрухту (подача до 20%).

Таблиця 1.7 - Порівняльна характеристика DRI та HBI з огляду на конструктивні особливості установок, собівартість виробництва та логістичні витрати

Показник	DRI	HBI
Конструкція установки DR/заводу	Спрощена конфігурація для холодного DRI. Подібна складність для установки з гарячим вивантаженням.	Додаткова система брикетування.
Собівартість виробництва	Нижча, ніж у HBI.	На \$5–10/т вища.
Умови морського транспортування	Необхідні спеціальні умови відповідно до чинних вимог ІМО.	Наразі аналогічні вимоги ІМО.
Вартість страхування	Страхування на \$4–5/т дорожче, ніж для HBI.	Нижча страхова вартість.
Внутрішнє транспортування	Залізничні та автомобільні перевезення без суттєвих проблем.	Жодних проблем із залізничним та автомобільним транспортуванням.

Таблиця 1.8 - Порівняння HBI та DRI щодо їхньої поведінки під час плавлення в електродуговій печі (ЕДП), а також втрат під час транспортування.

Показник	DRI	HBI
Цінність продукту: плавлення в ЕДП (залежить від частки в шихті)	<p>DRI забезпечує додаткову енергію для ЕДП завдяки вищому вмісту Fe_3C, що дозволяє зменшити витрати енергії та часу на плавлення порівняно з HBI.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Не потребує або майже не потребує вдування вугілля. - Легке утворення пінивого шлаку, що знижує витрати електродів та вогнетривів. - Швидше плавлення. 	<p>HBI (з низьким вмістом вуглецю) потребує більше енергії та часу для плавлення в ЕДП порівняно з DRI з високим вмістом вуглецю.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Потрібне зовнішнє вдування вугілля (з нижчим виходом), якщо використовується кисень. - Триваліше плавлення через утворення «ферообігріву» та охолодження ванни.
Втрати при транспортуванні (завантаження/вивантаження)	Близько 5% залежно від характеристик окатків.	Незначні.

Принцип дії EAF базується на пропусканні потужного електричного струму через графітові електроди, між кінцями яких і металевим шихтовим матеріалом (звичайно сталевим брухтом) утворюється електрична дуга. Дуга нагріває та розплавляє метал до рідкого стану. Для інтенсифікації плавлення сучасні EAF додатково застосовують кисневі фурми та пальники, які підводять тепло хімічними реакціями окиснення

вуглецю та газопаливним полум'ям [16]. Плавлення ведеться до отримання визначеної марки сталі, після чого піч нахилиється для зливу розплаву (операція вироблення плавки, або спуск металу) через лютку у сталерозливний ківш [15].

Процес роботи дугової печі складається з циклів (плавок), відомих як “tap-to-tap” цикл. Кожна плавка охоплює етапи: 1) завантаження металобрухту в піч; 2) плавлення та доведення металу до потрібної температури; 3) рафінування (знешлаковування, продування киснем для окислення небажаних домішок, легування тощо); 4) випуск сталі в ківш і видалення шлаку [15]. На початку циклу кришку печі відсувають і в кожух завантажують порцію брухту (зазвичай у великому кошику). Далі дах закривають, і через нього вводяться електроди. Подається напруга, виникають дуги, які плавлять метал. В процесі додають флюси для формування шлаку, що поглинає домішки (сірку, фосфор) і захищає ванну сталі від окиснення. Коли весь брухт розплавився і склад металу відкоригований, піч нахилиють для випуску сталі, після чого цикл повторюється для нової порції шихти [15]. Схематичний розріз зображено на рисунку 1.8

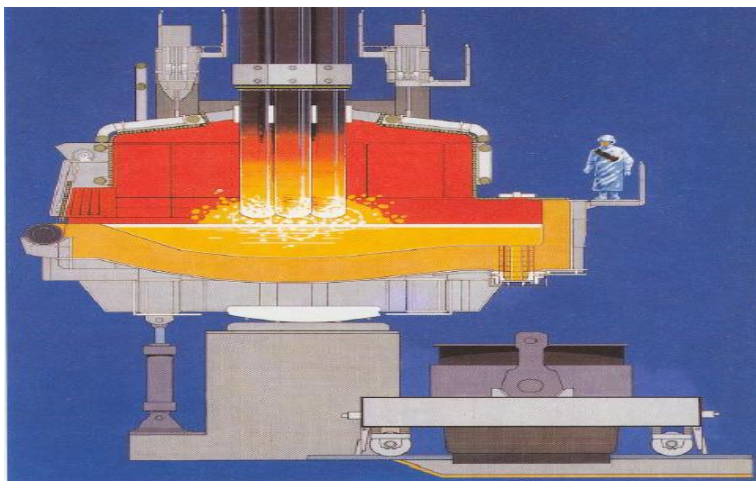


Рисунок 1.8 – Схематичний розріз ЕАФ

Три графітові електроди (жовті) через знімний водоохолоджуваний дах вводяться всередину футерованого вогнетривом сталевого кожуха печі; електричні дуги плавлять металеву шихту у ванні (рідкий метал позначено помаранчевим) [15].

Типова сталеплавильна EAF складається з циліндричного сталевого кожуха, футерованого зсередини вогнетривкою кладкою, та знімного склепіння (даху), яке може бути теж футерованим або водоохолоджуваним [15]. Через отвори в даху в піч входять один або кілька електродів – найчастіше три електроди при живленні трифазним струмом (для печей змінного струму) [15]. Електроди виготовляються з графіту великого діаметра (до 550–700 мм) і автоматично регулюються по висоті, підтримуючи стабільне горіння дуг [15]. Нижня частина робочого простору – горно печі – має чашоподібну форму, що сприяє збиранню металу. Стінки печі оснащені одним або кількома завантажувальними вікнами для подачі шихти (або для пальників і фурм) та випускним отвором (льоткою) для сталі [15]. Більшість сучасних печей виконані з ексцентриковим випуском (EBT – eccentric bottom tapping), де льотка розташована у днищі ближче до одного боку – це дозволяє ефективніше відокремити сталь від шлаку при випуску. Основні елементи печі зображено на рисунку 1.9.

1. Tilting Mechanism - механізм нахилу: забезпечує нахил печі для зливу сталі або шлаку. 2. Refractory Brick Swivel Roof - обертовий дах з вогнетривкої цегли: знімається для завантаження металу та захищає від теплових втрат. 3. Graphite Electrodes - графітові електроди: подають електричний струм до металу, створюючи дугу, що плавить шихту.

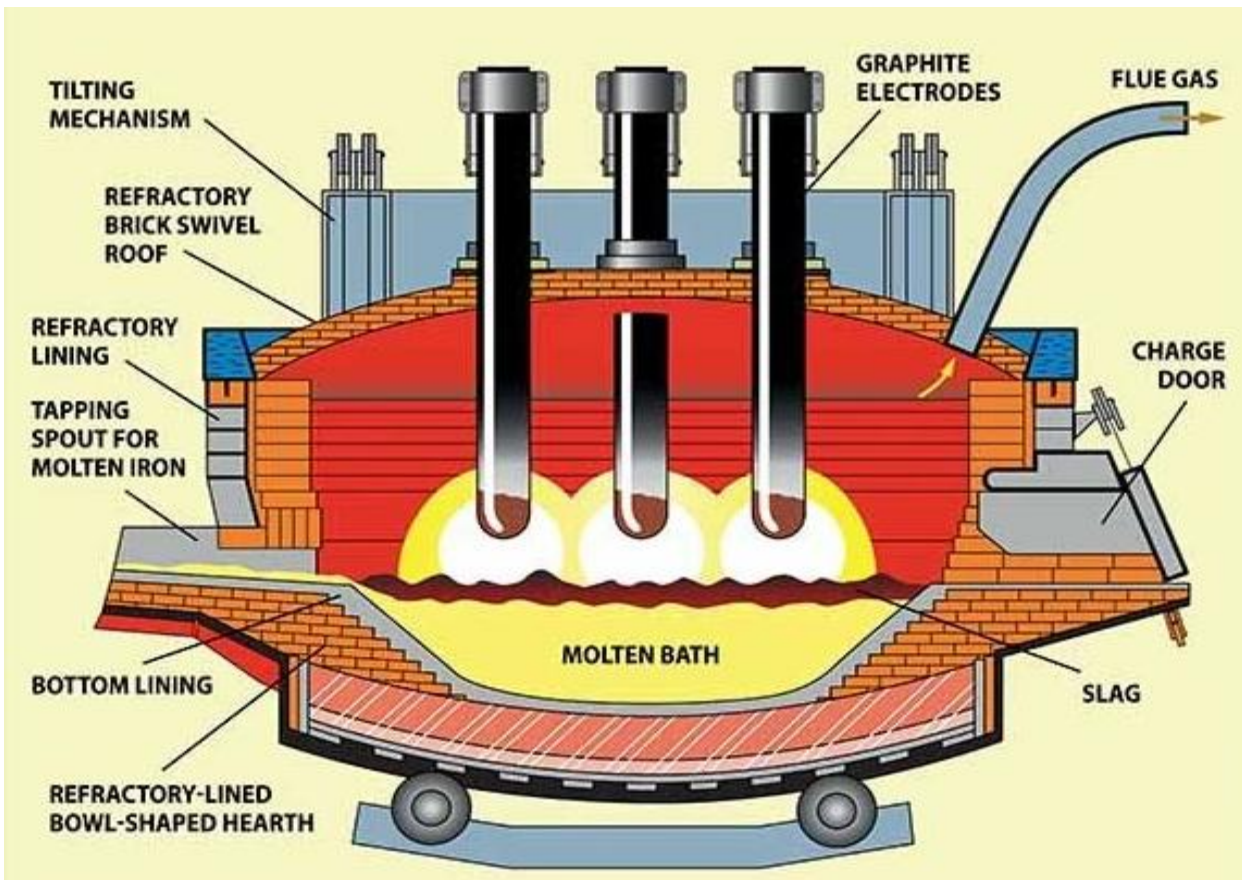


Рисунок 1.9 - Основні елементи EAF1.

4. Flue Gas - димовий канал: виводить продукти згоряння з печі. 5. Charge Door - завантажувальний отвір: використовується для додавання шихти або добавок під час плавлення. 6. Refractory Lining - вогнетривка футерівка: покриття внутрішніх стінок печі для захисту від високих температур і хімічного впливу

Піч встановлена на поворотному стенді, що дозволяє нахилити її в один бік для випуску сталі, а в протилежний – для видалення шлаку [15]. Окремо від корпусу печі розташовується механізм підйому-опускання електродів та масивні мідні шини, що підводять струм від трансформатора великої потужності [15]. Так, трансформатор сучасної ду-

гової печі може мати потужність десятки або навіть сотні мегавольтампер – наприклад, для печі ємністю 300 тонн типова встановлена потужність ~ 300 МВА [15]. На рисунку 1.10 зображено сучасну EAF.



Рисунок 1.10 - Сучасна EAF

Розміри та параметри. Типові сучасні EAF для виплавки сталі мають місткість від ~ 70 – 100 тонн до 200 – 300 тонн рідкої сталі за одну плавку. Для прикладу, піч ємністю 150 т може виплавляти таку кількість сталі приблизно за 30 – 50 хвилин дугового нагріву, тоді як конвертер (BOF) більшого розміру (150 – 300 т) виплавляє плавку за ~ 30 хв [15]. Найбільші у світі електродугові печі наближаються за продуктивністю до доменних/конвертерних агрегатів. Зокрема, найбільша діюча EAF (скрап-піч) — встановлена на заводі Токуо Steel в Японії — має разову продуктивність ~ 420 тонн та оснащена трансформаторами сумарною

потужністю 256 МВА (піч постійного струму з одним електродом-катодом) [15]. Плануються до запуску і нові печі надвеликого масштабу, як-от 190-тонна EAF для шведської компанії SSAB з трансформатором 280 МВА. Одну з найбільших у світі печей змінного струму зображено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Одна з найбільших у світі електродугових печей (EAF), призначена для шведської компанії SSAB.

Економічні показники: капітальні затрати, операційні витрати, собівартість сталі

CAPEX (Capital Expenditure). Електродугові печі привабливі тим, що вимагають менших початкових інвестицій на одиницю потужності виробництва сталі, ніж класичні інтегровані металургійні комбінати. Оціночно, будівництво нового EAF-мінізаводу коштує близько \$300–600 на тонну річної продуктивності (залежно від масштабу) [17]. Дже-

рела наводять орієнтовні цифри: ~\$250 за тонну для великого комплексу DRI-EAF і ~\$750 за тонну для “зелених” проєктів з повним циклом (включно з виробництвом водню) [18]. Для порівняння, традиційний цикл доменна піч–конвертер потребує значно більших вкладень – до ~\$1000 на тонну річної потужності (через вартість доменної печі, коксових батарей, аглофабрики тощо). Реальні проєкти демонструють цю різницю: наприклад, EAF-комплекс на 1,1 млн т/рік в Іспанії будується за €213 млн (≈\$230 млн) [11], тобто ~\$210 на тонну; водночас японська JFE інвестує \$2,1 млрд у EAF-проєкт на 2 млн т/рік (≈\$1050/т, включає новітні технології) [10].

OPEX (Operating Expenditure) та собівартість виробництва в EAF суттєво залежать від цін на сировину (металобрухт або DRI) та електроенергію. Основні статті витрат при плавці сталі в електродуговій печі:

Металобрухт. Вартість сталевого брухту може становити 50–80% собівартості сталі. На світовому ринку ціна брухту коливається широким діапазоном (наприклад, в США вона була ~\$400 за тонну у 2021 році) [16]. Використання заліза прямого відновлення (DRI) чи чавуну як частини шихти також впливає на витрати.

Електроенергія. Для плавлення 1 тонни сталі в сучасній EAF потрібно приблизно 400–440 кВт·год електроенергії [15]. Теоретичний мінімум складає ~300 кВт·год/т (енергія, необхідна для нагріву заліза до ~1520°C) [16]. Реально ж споживання більше через теплові втрати та потребу в додатковому рафінуванні. При вартості електроенергії ~6–7 центів за кВт·год (промислові тарифи у США) енергетична складова становить ~\$40 на тонну сталі [16]. В країнах з дорожчою електрикою частка витрат буде вищою. Інновації як-от регенерація тепла відвідних

газів (для підігріву брухту) дозволяють знизити енергоспоживання на ~15–20%.

Електроди та витратні матеріали. Графітові електроди вносять ~2–3% у структуру собівартості [16]. На тонну сталі витрачається ~2,5–3 кг електродного графіту, тому при цінах \$3–4 за кг це близько \$10 на тонну металу [16]. Вартість електродів може коливатися (графіт – товар з волатильним ринком). Також до витрат відносяться вогнетриви (футеровку печі періодично ремонтують), споживаний кисень та інші матеріали. Проте затрати на працю в розрахунку на тонну сталі доволі низькі – сучасні EAF автоматизовані, потребують ~0,003 людино-години на тонну [16] тобто один оператор може обслуговувати процес виплавки сотень тонн.

Собівартість та фактори рентабельності. За рахунок зазначених складових змінні витрати EAF-виробництва сталі зазвичай вищі, ніж у циклі з доменною піччю там, де дешеві руда і вугілля. За оцінками дослідження Колумбійського університету (2024), при середньосвітових цінах традиційний шлях BF-BOF забезпечує собівартість близько \$390 за тонну, тоді як при виплавці з брухту в EAF вона ~\$415/т, а при використанні DRI (природний газ) ~\$455/т [19]. Водночас регіональні фактори (ціни сировини, електрики, плата за викиди CO₂) можуть робити EAF більш вигідним варіантом. Наприклад, у США за відсутності вуглецевого податку витрати на тонну сталі в електропечах на природному газі або навіть з водневим DRI вже конкурентні з доменними: ~\$550/т для газового DRI-EAF проти ~\$565/т для BF-BOF (дані по США) [20]. В Європі ж введення ціни на CO₂ та подорожчання коксу зміщують економіку на користь EAF: при ціні CO₂ €50/т “зелений” водневий DRI-EAF може зрівнятися за собівартістю з доменною піччю [20].

Загалом, економічна ефективність EAF-мінізаводів найвища за умов: доступності недорогого брухту (або DRI), наявності дешевого і надійного енергопостачання, а також при гнучкому реагуванні на кон'юнктуру ринку (можливість зупиняти та запускати виробництво під попит) [21]. Натомість на інтегрованих комбінатах із доменним циклом великий постійний характер витрат, але при повному завантаженні вони можуть давати нижчу собівартість продукції в регіонах з дешевою сировиною. У таблиці 1.9 наведено порівняння економічних показників виробництва сталі: EAF та BF–BOF.

Таблиця 1.9 - Економічні показники виробництва сталі: порівняння EAF та BF–BOF

Показник	EAF (електродугова піч)	BF–BOF (доменна піч – конвертер)
CAPEX (капітальні витрати)	\$300–600/т річної потужності; до \$750/т для «зелених» проєктів	До \$1000/т річної потужності
OPEX (операційні витрати)	Залежить від цін на брухт/DRI та електроенергію; енергоємність ~400–440 кВт·год/т	Залежить від цін на руду, вугілля та кокс; енергоємність значно вища
Собівартість виробництва сталі	~\$415/т (брухт), ~\$455/т (DRI на природному газі), ~\$550/т (H ₂ -DRI)	~\$390/т (традиційний BF–BOF), ~\$565/т у США
Ціна сировини	Брухт \$350–450/т, DRI ~\$300/т	Руда + кокс дешевші в країнах-виробниках
Витрати електроенергії	400–440 кВт·год/т (~\$40 при \$0,1/кВт·год)	Низькі прямі витрати, але висока загальна енергоємність

Продовження табл. 1.9

Витрати на електроди	\$10–12/т сталі (~2,5–3 кг електродів по \$3–4/кг)	Немає
Витрати на працю	0,003 людино-год/т — висока автоматизація	Вищі, через складність процесу
Гнучкість виробництва	Висока: можна зупинити і запускати швидко	Низька: потрібне постійне завантаження
Вплив CO ₂ -регулювання	Вигідна модель у ЄС: при €50/т CO ₂ водневий DRI–EAF може бути конкурентним	Зростання витрат через викиди CO ₂ і подорожчання коксу

Порівняння EAF з доменним і конвертерним виробництвом

Сировина і технологія. Головна відмінність електродугової печі – використання в якості сировини переважно вторинного металу (сталевого брухту). У традиційному доменно-конвертерному циклі основною сировиною є залізна руда, що відновлюється до чавуну в доменній печі за допомогою коксу, і далі конвертується в сталь шляхом продування киснем [19]. EAF же напругу плавить тверді метали електричним теплом; в ній можна переплавляти 100% металобрухту [15]. Це робить EAF невід'ємною частиною циркулярної економіки сталі, дозволяючи переробляти відходи і зменшувати потребу в видобутку руди [19]. З іншого боку, наявність достатнього обсягу брухту високої якості обмежує частку EAF у глобальному виробництві (нині ~21% сталі у світі виплавляється саме з брухту в електропечах) [19]. Для виплавки високоякісних сталей на EAF шляхом додачі до брухту використовують чисті залізні матеріали – пряминовідновлене залізо (DRI/HBI) або рідкий чавун, щоб скоригувати хімічний склад та позбутися домішок. У доменних печах вихідний продукт (чавун) містить дуже високий вміст вуглецю ~4%, тоді як в дугових печах сталь можна виплавляти одразу близько 0,1% C, контролюючи склад через подачу легуючих добавок.

Масштаб і гнучкість. Доменні печі зазвичай є частиною великих комбінатів – їх типова продуктивність 3–5 тис. тонн чавуну на добу, що еквівалентно ~1–2 млн тонн сталі на рік з однієї домни. Тому мінімально ефективний масштаб доменно-конвертерного виробництва – кілька млн тонн на рік сталі, із безперервною роботою 24/7. Електродугові печі можуть бути ефективно використані в значно менших масштабах: міні-заводи EAF продуктивністю 0,3–1,0 млн т/рік є поширеною

практикою [17]. EAF легше зупинити або запустити залежно від потреби (наприклад, можна просто не проводити нову плавку після випуску сталі, якщо попит слабкий) [21]. Це дає гнучкість і економію енергії у періоди простою, тоді як доменна піч повинна працювати безперервно (зупинка і розпал домни – надзвичайно тривалий і витратний процес). Таким чином, EAF-підприємства (міні-мілли) особливо вигідні для ринків, де потрібна гнучкість і наближеність до споживача (вони часто орієнтуються на локальні ринки металопрокату) [15].

Енергоефективність і витрати енергії. У доменному процесі велика частина енергії надходить хімічно від спалення коксу, тоді як в EAF – у вигляді електрики. Пряме порівняння складне, але оцінки показують, що енергоємність повного циклу BF-BOF приблизно в 4–5 разів вища, ніж у EAF [16]. Для плавки 1 тонни сталі електродуговим способом потрібно ~440 кВт·год електроенергії [15] (що еквівалентно ~1,6 ГДж), тоді як на тонну сталі через доменний процес витрачається ~18–30 ГДж енергії (в основному із спалення вуглецю у домні). Однак сучасні доменні печі часто ефективно використовують тепло, і частину енергії можна повернути (наприклад, засоби утилізації теплоти газу). EAF теж удосконалюються – застосування попереднього підігріву брухту (системи типу Consteel, шахтні печі) знижує потрібну електроенергію на 15% і більше.

Екологічні аспекти. Електродугові печі вважаються більш екологічно чистими в контексті прямих викидів, оскільки не потребують коксу і не генерують великої кількості доменного газу. Викиди CO₂ на 1 тонну сталі в середньому становлять: ~2,3 т CO₂/т для циклу BF-BOF, ~0,7 т CO₂/т для EAF на брухті, і ~1,4 т CO₂/т для комбінованого маршруту

DRI-EAF на природному газі [16]. Різниця колосальна: доменний процес – один з найбільших промислових джерел парникових газів, тоді як EAF на 100% брутто скорочує ці викиди на ~70% [19]. Звичайно, слід врахувати викиди від виробництва самої електроенергії: якщо вона “зелена” (від ВДЕ або атомної генерації), то електропічне виробництво сталі може звести до мінімуму вуглецевий слід на тонну продукції. Натомість доменний шлях навіть з урахуванням найкращих доступних технологій завжди пов’язаний зі спаленням значної кількості вуглецю (вугілля). Тому глобальний тренд декарбонізації металургії полягає у заміщенні доменних печей на DRI-EAF, де відновлення заліза здійснюється воднем або газом, а плавка – електрикою. Багато провідних виробників анонсували плани перевести сталеплавильні агрегати на електродуговий процес у поєднанні з “зеленим” відновленням заліза.

Якість сталі. Історично EAF виплавляли переважно вуглецеві конструкційні сталі (особливо сортовий прокат, арматуру) – тобто сегмент, де вимоги до чистоти металу трохи нижчі, а брутто вистачає [15]. Інтегровані комбінати доменного циклу домінували у виробництві високоякісного плоского прокату (автомобільні листи, лист для харчової жерсті тощо). Однак сучасні технології (вакуумування сталі, використання DRI з низьким вмістом домішок, позапічна обробка) дозволили EAF-мінізаводам значно підвищити якість продукції. Нині електропечі успішно виробляють леговані, нержавіючі сталі, рейкову сталь та інші вимогливі марки. Наприклад, на EAF можна виготовляти заготовки для автомобільних листів, якщо частково заряджати її чистим чавуном/DRI і забезпечити належне рафінування – цим шляхом ідуть “зелені” проекти провідних металургійних компаній (ArcelorMittal, voestalpine, SSAB тощо). Таким чином, за належного технологічного оснащення розрив у якості

між EAF і конвертером практично відсутній. У таблиці 1.10 показано порівняння EAF та BF–BOF за ключовими технологічними та економічними параметрами.

Таблиця 1.10 — Порівняння EAF та BF–BOF за ключовими технологічними та економічними параметрами

Критерій	EAF (Електродугова піч)	BF–BOF (Домений + Конвертер)
Сировина	Металобрухт, DRI, чавун	Залізна руда, кокс
Споживання енергії	≈1,6 ГДж/т сталі (електроенергія)	≈18–30 ГДж/т сталі (в основному кокс)
CO ₂ -викиди	~0,7 т CO ₂ /т (на брухті), ~1,4 т CO ₂ /т (DRI)	~2,3 т CO ₂ /т сталі
Капітальні витрати	\$300–600/т річної потужності	До \$1000/т річної потужності
Гнучкість виробництва	Висока, можливе періодичне зупинення	Низька, постійна робота 24/7
Мінімальний масштаб	0,3–1 млн т/рік (міні-завод)	2–3 млн т/рік (комбінат)
Якість сталі	Підходить для конструкційних та високоякісних сталей (з DRI, обробкою)	Високоякісна сталь (плоский прокат, автолист тощо)
Декарбонізація	Можливий перехід на “зелений” DRI + ВДЕ	Складна декарбонізація через спалення вугілля

Приклади існуючих EAF у світі

Станом на 2025 рік електродугові печі використовуються по всьому світу, а частка сталі, виплавленої в EAF, зростає. Наведемо

декілька показових прикладів та характеристики сучасних EAF-виробництв:

Nucor Corporation (США): Найбільший виробник сталі методом EAF у Північній Америці. Компанія експлуатує 26 міні-заводів, які щорічно переробляють понад 20 млн тонн брухту на нову сталь [22]. Nucor стала лідером завдяки моделі міні-мільнів, виробляючи ~25 млн тонн сталі на рік із низьким вуглецевим слідом. Її підприємства випускають арматуру, лист, балки та інший прокат, забезпечуючи значну частку внутрішнього ринку США сталевого прокату. Nucor також є найбільшим ресуслер (переробником) металобрухту в Північній Америці [15].

Токуо Steel (Японія): Компанія оперує найбільшою у світі скрап-піччю (EAF на брухті) постійного струму з масою плавки 420 тонн [15]. Ця дугова піч обладнана вісьмома трансформаторами по 32 МВА (сумарно 256 МВА) і здатна виплавляти ~3–4 млн тонн сталі на рік. Токуо Steel є прикладом успішної стратегії виробництва високоякісної сталі (в т.ч. листового прокату) повністю на брухтовій базі, конкуруючи з доменними гігантами Японії.

Європа (Італія та Іспанія): В Італії частка EAF у виробництві сталі перевищує 75% – діють десятки електропечей середньої ємності 100–150 т, що виробляють сортовий прокат і спеціальні сталі. Наприклад, компанія Feralpi та AFV Beltrame експлуатують печі ~100–130-тонного класу для виплавки будівельної сталі. В Іспанії на заводі CELSA Barcelona встановлено дві EAF (по ~150 тонн), які забезпечують ~2,5 млн т арматури та сортового прокату на рік. Компанія Sidenor (Іспанія) виробляє спеціальні сталі на електропечах з використанням до 25% чавуну в шихті, щоб досягти високої якості.

Близький Схід (ОАЕ): Emirates Steel в Об'єднаних Арабських Еміратах демонструє модель інтегрованого EAF-комплексу з повним циклом на основі газового відновлення заліза. Комбінат виробляє ~3,1 млн тонн сталі на рік, використовуючи установку прямого відновлення заліза (DRI) і електродугові печі ~150 тонн. Це дозволяє випускати високоякісний прокат (зокрема арматуру для будівництва) при повній відсутності доменного виробництва і з мінімальними викидами CO₂.

Китай: У Китаї частка EAF ще відносно невелика (~10% виробництва), проте зростає швидкими темпами. Багато китайських EAF – це менші печі (50–100 т) для виплавки конструкційної сталі з брухту. Але останніми роками великі металургійні групи КНР встановлюють сучасні EAF великої місткості, щоб скоротити викиди. Приклад – новий металургійний комплекс Guangdong Jinshenglan (провінція Гуандун), де змонтовано чотири EAF по 150 т ультрависокої потужності з безперервним поданням шихти (т.зв. “zero-bucket” технологія від Danieli) [23]. Такі печі оснащені шахтою для підігріву брухту та автоматизованими системами впорскування кисню, що забезпечує високу продуктивність і енергоефективність [23].

Нові та заплановані EAF-проекти

У зв'язку з глобальною декарбонізацією сталеливарної промисловості спостерігається інвестиційний бум у будівництво нових EAF та переобладнання існуючих заводів. Нижче наведено кілька прикладів анонсованих проектів електродугових печей, що відображають цей тренд:

ArcelorMittal (Іспанія, Гіжон): Будується нова EAF ємністю 1,1 млн т/рік на довгопрокатному заводі в Гіжоні. Інвестиція складає €213 млн; запуск очікується в I кварталі 2026 року [11]. Ця піч замінить одну з

доменних печей, що дозволить скоротити викиди CO₂ на ~35% (до 1 млн т CO₂ на рік після повного переходу) [11]. Шихта включатиме металобрухт і DRI, а живлення – “зеленою” електроенергією (вітровою і сонячною), коли буде доступна [11].

ArcelorMittal Dofasco (Канада): В м. Гамільтон проводиться трансформація комбінату – виведення доменних печей і встановлення комплексу DRI та EAF. Проєкт вартістю CAD\$1,8 млрд (≈\$1,3 млрд) отримав підтримку урядів Канади та Онтаріо [23]. Планується збудувати EAF продуктивністю 2,4 млн тонн на рік, яку інтегрують в наявний прокатний комплекс [23]. Запуск заплановано на 2027 рік, а повний перехід на нову технологію – до 2028 року [23]. Це скоротить викиди комбінату ~на 60%, усунувши споживання вугілля і руди [23].

JFE Steel (Японія): Один із найбільших японських сталеварів буде EAF на своєму заводі West Japan Works (Курасікі) як заміну доменної печі. Новий комплекс розрахований на ~2 млн т сталі на рік, інвестиції – ¥329,4 млрд (≈\$2,1 млрд) [10]. Проєкт отримав державне співфінансування ~¥104,5 млрд, оскільки впроваджує передові технології низьковуглецевого виробництва [10]. EAF від JFE використовуватиме запатентовану технологію плавлення з підвищеною якістю і ефективністю, а також передбачає використання DRI з проєкту GI Fund (Green Innovation) [10]. Введення в експлуатацію очікується до 2027 року.

SSAB (Швеція): Компанія SSAB в рамках переходу на виробництво “фосилевільної” сталі (програма HYBRIT) замовила у SMS Group будівництво великої EAF в м. Окселосунд. Нова піч змінного струму матиме масу плавки 190 тонн і буде однією з найбільших у світі EAF, з трансформатором на 280 МВА [10]. Запуск заплановано на кінець 2026

року, піч працюватиме на залізі прямого відновлення (DRI на водні) замість доменного чавуну. Це дозволить SSAB закрити доменні печі і знизити викиди CO₂ на ~90%.

Hyundai Steel (США): Південнокорейська компанія оголосила про намір збудувати EAF-based меткомбінат у штаті Луїзіана, США. Проєкт оцінюється в \$5,8 млрд, продуктивність підприємства – 2,7 млн тонн сталі на рік [24]. Це буде перший американський “інтегрований” завод на базі електродугової технології, що охопить всі стадії – від виробництва DRI до прокату [24]. Планується випускати високоякісний лист для автомобілебудування; запуск очікується у 2029 році [24]. Проєкт створить ~1300 робочих місць і розташований поблизу заводів Hyundai/Kia, підкреслюючи вертикальну інтеграцію. Завод використовуватиме газове або водневе DRI та сучасні EAF, що суттєво знизить вуглецевий слід продукції.

Voestalpine (Австрія): Підприємство готується замінити дві доменні печі (у Лінці та Донавіці) на дві електродугові печі до 2027 року. Інвестиції в розмірі €1,5 млрд дозволять виробляти ~2,5 млн тонн сталі на рік з пониженими на 30–40% викидами CO₂ [25]. Кожна EAF (проектна продуктивність ~1,25 млн т/рік) працюватиме на змішаній шихті (брухт + залізорудні брикети з нового заводу прямого відновлення). Цей крок – частина програми Greentec Steel, мета якої – поступово довести виробництво Voestalpine до кліматично нейтрального рівня.

1.6.Сучасні установки піч-ківш (LF) та вакуумного обезвуглецювання сталі (VD, VOD, RH)

Технологічні принципи роботи: Піч-ківш (LF) – це стаціонарний сталерозливний агрегат електричного нагріву, призначений для дозрі-

вання рідкого металу після дугової чи кисневої плавки. У ньому сталевий розплав підігрівається графітовими електродами, зануреними у шлак на поверхні металу [26]. Під дугами (приблизно $3^{\circ}\text{C}/\text{хв}$) здійснюється вирівнювання температури та хімічного складу, а нижнє продування аргоном інтенсифікує перемішування та реакції (распушення шлаку, видалення небажаних домішок) [26]. На поверхні рідкого металу формується захисний десульфурувальний шлак, що запобігає закипанню й окисненню та забезпечує глибоке видалення кисню й сірки [14]. ЛП виконує також роль «буферу» в логістиці (накопичує сталь перед розливом) і дозволяє дозовану подачу сплавів чи дроту (через автомати годувачі) для точної корекції складу [26].

Вакуумні установки використовуються для очищення рідкої сталі від газів і домішок під зниженим тиском. VD (лійкове вакуумування): ківш з гарячим металом поміщають у герметичну камеру, із якої відкачується повітря до тисків $\sim 0.5\text{--}1.3$ мбар [27]. Через пористу вставку в днищі через метал продувається аргоном, що інтенсифікує формування CO-бризок ($\text{C}+\text{O}\rightarrow\text{CO}$), глибоку десульфуррацію і видалення азоту [26]. Установки мають шлюзову лійку для додавання легувальних добавок у вакуумі [26], це схематично зображено на рисунку 1.12. Загалом VD забезпечує видалення водню, кисню, сірки і частково зменшує вміст вуглецю (без активного здування кислородом) [26].

VOD (вакуум-кисневе обезвуглецювання): на базі VD-камери зверху додають водоохолоджувану кисневу лійку. При тисках $\sim 50\text{--}200$ мбар по поверхні металу подають чистий O_2 , який окиснює вуглець ($\text{C}\rightarrow\text{CO}/\text{CO}_2$), та утворені гази відсмоктує вакуумне обладнання [27]. Після цього часто виконується короткий VD-етап при вищому вакуумі

для остаточного зниження С. VOD особливо ефективний при виробництві низьковуглецевих нержавіючих сталей [27]. Схематично VOD зображено на рисунку 1.13.

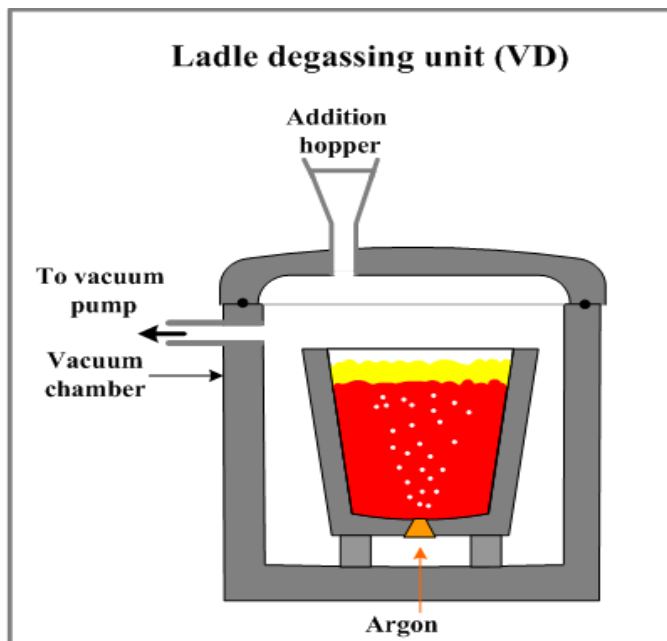


Рисунок 1.12 - Схема видалення розчинених газів для покращення якості металу

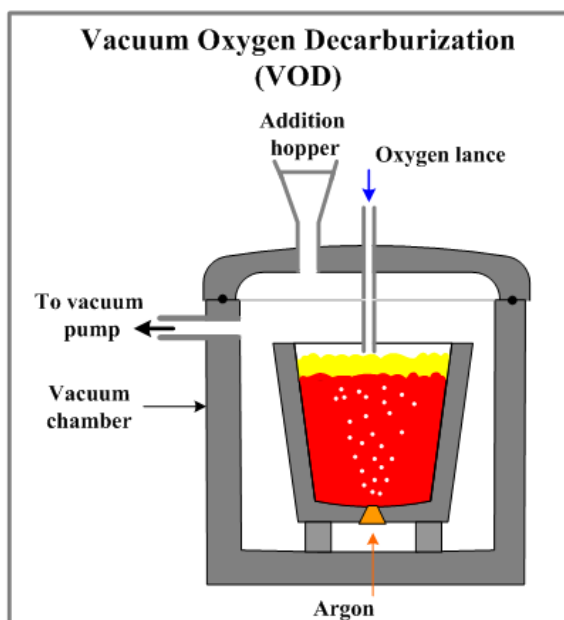


Рисунок 1.13 - Установа вакуумного кисневого рафінування (VOD)

RH (Ruhrstahl-Heraeus): у вакуумній посудині є дві занурені трубки (сноркелі), з'єднані з верхньою камерою. В один сноркел подається аргон, що піднімає сталевий стовп; інший сноркел дозволяє циркуляцію металу назад у ковш [26]. Таким чином розплав циркулює із дуже великою продуктивністю (~150–200 т/хв), що забезпечує швидке видалення розчинених газів. Системи RH теж мають шлюзові лійки для додавання сплавів чи шлаку у вакуумі [26]. Переваги RH включають глибоке обезвуглецювання (низький вміст C), швидке видалення H і O, точне легування та вирівнювання хімічного складу та температури [26]. Існує варіант RH-OB з верхньою лійкою подачі кисню для ще більш інтенсивного відновного обезвуглецювання ($C+O\rightarrow CO$) під час вакууму [26]. Схематично RH зображено на рисунку 1.14.

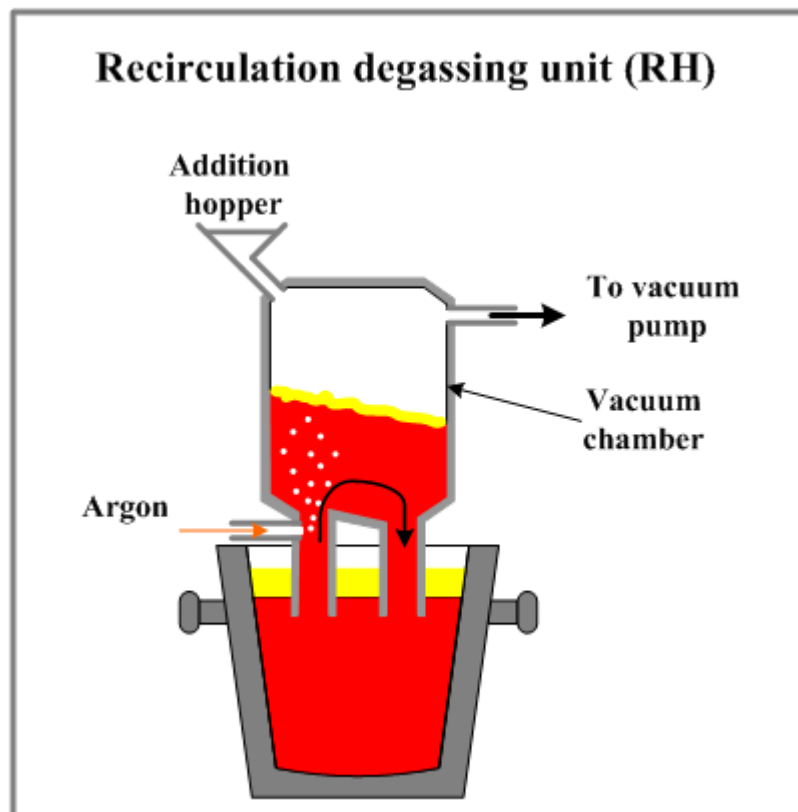


Рисунок 1.14 - Установка рекуперативної вакуумної дегазації (RH)

Основне обладнання та компоненти

У комплект піч-ковш входять: електрична частина (важкий трансформатор/випрямляч, система контролю струму/напряму арок і графітові електроди з висувним приводом) [26]; пристрій подачі легувань (багатопозиційні станції дровових кормових машин для порошкових шихт, лійки-інжектори аргону та кисню) [26]; аргонова продувка (пориста футерівка днища); конструкція купола (водоохолоджувана кришка з керамічним центром для захисту від теплового випромінювання) [14]; мости та крани для транспорту ковша (пересувний стенд з нахилом ківша, газові з'єднувачі, датчики).

Установки вакуумного оброблення (VD/VOD/RH) містять: вакуумну камеру (бак, що герметично накриває ковш); вакуумні насоси та пульсарні системи (сухі вакуумні та форвакуумні насоси великої потужності) [27]; аргонову магістраль; кисневі лійки (для VOD/RH-OB); шлюзові добавочні лійки; вакуумні засувки і двері; консолі управління та очищення газів (газоочистка від пилу і випарів). Сучасні вакуумні системи можуть бути оснащені цифровим контролем тиску й температури та автоматизацією процесів (Leybold, Edwards тощо) [27].

Основні виробники та постачальники

На світовому ринку LF-обладнання провідними постачальниками є SMS group (Німеччина), Danieli (Італія) і Tenova (Італія/США), Primetals Technologies (Японія/Великобританія), Inductotherm (США), AICHELIN (Австрія), INTECO (Австрія) тощо [28]. Зокрема, SMS побудувала понад 500 нових LF у світі [28], а Danieli понад 40 років постачає обладнання для вторинної металургії [28]. Для вакуумування лійкового і циркуляційного типу (VD/RH/VOD) також провідні SMS (RH, VOD), Tenova (VD/VOD/RH), Primetals (RH), SENCO, Nippon Steel (Японія),

Масо (Китай), Vasculex (Великобританія) тощо. Крім того, є багато інших міжнародних фірм та конгломератів (наприклад, Primetals має внутрішні бренди, MTAG, ABSP), що пропонують проектування і постачання «під ключ».

Приклади інсталяцій

ArcelorMittal Temirtau (Казахстан, 2018): встановлено нову дво-позиційну ЛФ ємністю 2×290 т від SMS group [3].

SAIL Rourkela (Індія, 2010): введено в експлуатацію другу ЛФ (150 т) на сталеплавильному цеху №2, виготовлену Danieli India [3].

Altos Hornos de México (AHMSA, Монклова, Мексика, 2019): введена в дію двокамерна RH-установка (150 т) від Primetals Technologies [29].

ArcelorMittal Hunedoara (Румунія, 2015): замовлено 100-тонну вакуумну десульфуризаційну установку з механічним вакуумом (постачальник MTAG, Швейцарія) [3].

ArcelorMittal Fos-sur-Mer (Франція, 2024): введено в експлуатацію ЛФ із двома 330-т ковшами; очікується збільшення використання сталю брукху у 5 разів і зменшення потреби в гарячому чавуні на 10%, що дасть економію CO₂ близько 10 % (проект оголошено у 2021, освячено у 2024) [3].

Приклади в Україні:

ПРАТ «Інтерпайп Сталь» (Дніпро): металургійний завод із виплавки сталі у Дніпрі. Комплекс обладнано дуговою піччю, вакууматором (двокамерним) та двопозиційною установкою «піч-ковш» [30]. Цей комбінат спроектований як трубний з повною вторинною обробкою рідкої сталі.

«КАМЕТ-СТАЛЬ» (Київська обл.): у травні 2025 року завершено капітальний ремонт LF №1. Основним результатом стало оновлення водоохолоджуваного купола печі, що покращило теплову стабільність і якість стали [3].

Інші українські заводи: ArcelorMittal Кривий Ріг та Запоріжсталь обладнані системами вторинної металургії (LF та вакуумуванням), модернізація і будівництво яких постійно проводиться. (Наприклад, АМКР оголошував про розбудову нової ЛФ для зменшення CO₂, аналогічно до Fos-sur-Mer).

Економічні аспекти

Будівництво або модернізація LF та вакуумних установок (VOD) потребує значних інвестицій (як правило, це десятки мільйонів доларів для комплектного проекту). Проте такі інвестиції зазвичай швидко окупаються за рахунок підвищення продуктивності і економії енергоресурсів. Наприклад, введення ЛФ на ArcelorMittal Fos-sur-Mer дозволило збільшити частку брухту в конвертері у 5 разів і зменшити перехід гарячого металу на 10 %, що привело до зниження CO₂ на близько 10 % [11]. З урахуванням того, що лампідаційна ЛФ споживає близько 0,5 ГДж/т сталі, а вакууматор – ~0,2 ГДж/т (за даними World Steel Association), економія енергії при заміні частини гарячого металу на брухт (де кожен тон гарячого металу вимагає на десятки ГДж енергії в BOF/BF-системах) набагато перевищує додаткові витрати ЛФ. Іншими словами, енергетичний «профiт» від збільшеної переробки брухту суттєво переважає енерговитрати на роботу ЛФ і вакууматора. Зростання виходу продукції високої якості (менше дефектів і відходів) також покращує рентабельність.

Порівняння витрат: будівництво нової ЛФ ємністю 100–150 т часто коштує кілька мільйонів доларів, а вакуумного цеху (VD/VOD/RH) зі схожою продуктивністю – ще більше (враховуючи дороговартісні насоси й конструкцію камери). Проте за рахунок зниження витрат на паливо (менше окатишів та коксу), економії електроенергії (при зменшенні виплавки з BF) і підвищення виплавки сталі окупність може становити кілька років. Наприклад, один з аналізів показав, що встановлення ЛФ дозволяє суттєво знизити витрати на отримання потрібної температури і складу металу порівняно з доочищенням у конвертері або ковші. Конкретні економічні показники залежать від цін на енергію, вартість лому та специфікацій сталі, але загальна тенденція полягає у позитивній економії при впровадженні ЛП і вакуумування. Порівняння наведено в таблиці 1.11.

Таблиця 1.11 - Порівняльна таблиця економічних показників LF та VD/VOD/RH.

Параметр	Піч-ковш (LF)	Вакуумні установки (VD/VOD/RH)	Примітка
Вартість будівництва	\$2–5 млн	\$5–10 млн	VD/VOD/RH дорожчі через вакуумні насоси й камеру
Продуктивність	100–150 т/плавка	100–150 т/плавка	Схожі показники
Енергоспоживання	Помірне	Високе	Вакуум вимагає більше енергії
Покращення якості сталі	Високе	Дуже високе	RH і VOD дозволяють знизити вуглець, водень, азот

Продовження табл. 1.11

Зменшення витрат на доменне виробництво	Так	Так	Можливість зниження потреби в окатишах/коксі
Економія на енергії	Відчутна	Менша	LF дає енергетичну перевагу у порівнянні з конвертерами
Окупність	2–4 роки	3–6 років	Залежить від цін на енергію, типу сталі
Гнучкість виробництва	Висока	Середня	LF легше впровадити на міні-заводах

1.7 Ливарно-прокатні модулі: сучасний стан і перспективи

Ливарно-прокатний модуль (ЛПМ) – це комплексне металургійне обладнання, що поєднує безперервне лиття сталі (через машину неперервного лиття заготовок, МНЛЗ) з подальшою гарячою прокаткою в єдиному технологічному потоці [31]. Такий модуль дозволяє одержувати готовий прокат без традиційних стадій охолодження та повторного нагрівання заготовок. На відміну від класичних схем (ливарня – склад заготовок – нагрів – прокатний стан), у ЛПМ відлитий напівфабрикат (сляб, блюм або заготовка) відразу, ще в гарячому стані, передається на прокатний стан [31]. Це забезпечує скорочення числа технологічних операцій, економію енергії та зниження викидів, адже виключається додатковий нагрів металу перед прокаткою [31].

Переваги ЛПМ. Поєднання процесів лиття і прокатки дає низку техніко-економічних переваг:

Зменшення витрат – як капітальних (менше обладнання та інфраструктури), так і операційних (менше енергії на нагрів, менше персоналу) [31].

Підвищення продуктивності – процес проходить швидше за рахунок відсутності тривалих проміжних стадій (охолодження-складування-реверберація) [31].

Вищий вихід придатного металу – усуваються втрати на обрізь голови та днища злитків, адже понад 97% світової сталі нині розливається на МНЛЗ безпосередньо [31].

Компактність і гнучкість виробництва – міні-заводи на базі ЛПМ можна розміщувати ближче до споживача, використовувати локальну сировину (металобрухт, пряме відновлене залізо) і випускати необхідний сортамент під замовлення невеликими партіями [31].

Види та розвиток ЛПМ. Існують дві основні категорії литейно-прокатних модулів за типом кінцевої продукції: плоский прокат (листи, рулони) та сортовий прокат (довгомірні профілі). Концепція поєднання лиття і прокатки зародилася ще у ХХ ст. – спочатку для довгомірних виробів. Перші сортові ЛПМ з'явилися у 1970-х роках для безперервного лиття і прокатування катанки (дроту) та простих профілів (круг, квадрат) безпосередньо в бунтах (катушках) або прутках [31]. У 1980-х інженери взялися за компактні схеми для плоского прокату – так виникла технологія тонкослябового лиття: розлив сталі у тонкий сляб (50–70 мм) з наступною гарячою прокаткою в смугу [31]. Перший у світі промисловий ЛПМ для гарячекатаних рулонів запрацював у 1989 році на заводі Nucor (США) [31]. Відтоді ця технологія стрімко поширилася: литейно-прокатні модулі масово будують як на міні-заводах з електро-

плавкою сталі, так і на великих інтегрованих комбінатах з конвертерним виробництвом [31]. Сьогодні всі провідні інжинірингові компанії світу (Primetals, SMS group, Danieli, Sumitomo та ін.) пропонують власні рішення ЛПМ [31]. Найвідоміші технологічні концепції: CSP (Compact Strip Production), ISP (In-line Strip Production), ESP (Endless Strip Production), QSP (Quality Strip Production) та TSP (Tippins–Samsung Process) – різновиди тонкослябових ліній для рулонного прокату [31]. Окремо розвивається напрям валкової розливки (twin-roll casting) – технології, де рідка сталь твердне між двома охолоджуваними валками, формуючи тонку стрічку без стадії сляба [31].

Нижче детально розглянуто актуальні литейно-прокатні модулі за видами продукції – рулонний та листовий плоский прокат, арматура, інші профілі – з фокусом на технічні характеристики, географію проектів, економіку та постачальників обладнання.

ЛПМ для рулонного прокату (гарячекатані рулони і тонкий лист)

Литейно-прокатні комплекси для виробництва гарячекатаних рулонів – це, як правило, тонкослябові агрегати: сталеплавильний переділ (конвертер або електродугова піч) з установками позапічної обробки, одна або кілька МНЛЗ для тонких слябів, нагрівально-утеплювальна піч (проміжний тунель) та прокатний стан для гарячої смуги [31]. В таких модулях розливають сляби товщиною ~50–70 мм [31]. (для порівняння, традиційні сляби – 200–250 мм). Сляб після короткого вирівнювання температури (20–30 хв у печі при ~1150 °С) надходить у групу клітей без охолодження [31]. На сучасних лініях встановлюють 5–7 прокатних станів, які прокочують смугу до товщини 0,8–16 мм (окремі модулі – ESP – до 0,6 мм [31]. Гарячий прокат охолоджується на роль-

гангу і намотується в рулон звичайної маси 15–30 т. Завдяки виключенню проміжних операцій якість металу покращується – зокрема, структура дрібнозерниста, без великих дендритів та з меншою сегрегацією домішок [31]. На рисунку 15 зображено схему литейно-прокатного модуля, розроблену компанією SMS group.

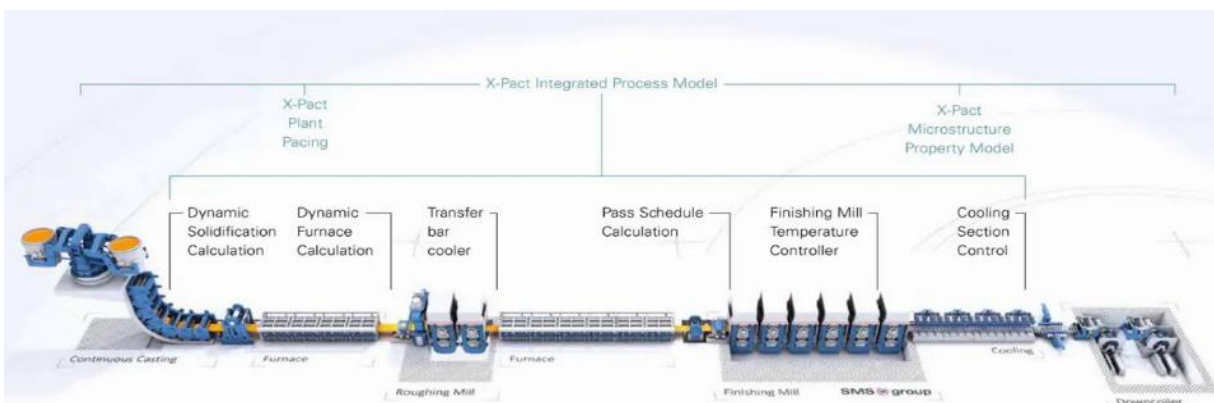


Рисунок 1.15 - Схема ливарно-прокатного модуля

Приклади та географія. Технологію тонкослябового лиття-прокатки (CSP та аналоги) вперше реалізовано в США (Nucor Crawfordsville, 1989 р., ~1,5 млн т/рік) [31]. Сьогодні у світі діють десятки таких модулів. Зокрема:

ArcelorMittal/NSIC (Індія) – тристандовий CSP-комплекс виробництва SMS з потужністю ~3 млн т/рік (запущений на заводі Essar у 1996 р.) [14].

Shougang Jingtang (Китай) – дволінійний комплекс типу DUE® від Danieli, сумарною продуктивністю ~4,2 млн т/рік гарячого рулону (кожна лінія ~2,1 млн т) [32].

Acciaieria Arvedi (Італія) – перша у світі технологія ESP (Endless Strip Production) від Primetals/Arvedi, запущена у 2009 р. на заводі в Кремоні. Лінія виробляє рулони шириною до 1560 мм і товщиною від

0,8 мм безперервним (endless) процесом; після модернізації 2021 р. її потужність перевищила 2 млн т/рік [31].

Rizhao Steel (Китай) – найбільший у світі кастинг-ролінг комплекс: 5 ліній ESP, загальна потужність ~12 млн т/рік [29]. Три лінії шириною 1600 мм дають по 2,55 млн т/рік, дві лінії 1300 мм – по 2,0 млн т. На цьому підприємстві вперше досягнуто мінімальну товщину гарячого рулону 0,6 мм [29].

До 2025 р. компактні стани CSP/ESP були збудовані в США (Nucor, Steel Dynamics, Big River Steel та ін.), ЄС (Італія, Німеччина, Бельгія), Японії, Південній Кореї, Індії, Туреччині, Бразилії, Україні (про плани в Україні – далі). Продуктивність однієї лінії нині становить від 1 до 3 млн тонн рулонів на рік (залежно від кількості потоків МНЛЗ та клітей). Для збільшення випуску на комбінатах часто встановлюють 2–3 тонкослябові МНЛЗ паралельно на один стан (наприклад, 3-слябова установка CSP дозволила індійському заводу NMDC досягти 2,9 млн т/рік гарячого прокату при товщині 1–16 мм [32]).

Економіка проектів. Будівництво CSP-/ESP-модуля є капіталомістким, але економічно виправданим при річному обсязі ~1 млн т і вище [31]. Для порівняння, традиційні широкосмугові стани рентабельні лише від ~2,5–3 млн т/рік [31]. Завдяки компактності і автоматизації сучасний ЛПМ потребує менших інвестицій на тонну потужності, ніж класичний прокатний цех. За оцінками Danieli, міні-завод з Micromill (250–300 тис. т сортового прокату на рік) може бути побудований із капзатратами, характерними для звичайного заводу на 1–1,5 млн т [32]. Окупність таких проектів підвищується за рахунок економії газу (немає нагрівальних печей перед прокаткою), зменшення штату і витрат на об-

слуговування обладнання [31]. Наприклад, у технології Arvedi ESP заявлено мінімальне споживання енергії та палива – відсутні печі згоряння, використовується лише електроенергія; відповідно, ESP позиціонується як «зелена» технологія з нульовим споживанням викопного палива [29].

Українські проекти. Станом на 2023 р. в Україні повноцінні ЛПМ для рулонного прокату ще не реалізовані, але плануються. Група «МЕ-ТІНБЕСТ» розглядала будівництво киснево-конвертерного цеху і литейно-прокатного модуля (типу CSP) на комбінаті «Запоріжсталь» [33].

Також опрацьовуються варіанти кардинальної модернізації комбінату «КАМЕТ-СТАЛЬ» – встановлення ДП/конвертерів або Direct Reduction + Електропіч разом із сучасними литейно-прокатними блоками [31]. Натомість ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у 2000-х відмовилося від планів закупити та встановити два литейно-прокатні модулі типу Luna (технологія компанії SMS) для виробництва тонкого листа [34].

Замість цього підприємство обрало шлях поетапного введення окремих МНЛЗ і традиційних прокатних станів. Зокрема, у 2011–2018 рр. АМКР ввів дві сучасні машини безперервного лиття заготовок та модернізував дротовий стан під гаряче завантаження, що дозволяє частково реалізувати концепцію «лиття-прокат» для сортових напівфабрикатів. Проте власного виробництва гарячекатаних рулонів або листів в Україні наразі немає – цей сегмент покривався імпортом або прокатом давальницьких слябів (як на Маріупольських комбінатах до 2022 р.). У таблиці 12 наведено діючі литейно-прокатні модулі для рулонного прокату.

Таблиця 12 — Діючі литейно-прокатні модулі для рулонного прокату

Підприємство (країна)	Технологія (постачальник)	Продукція	Потужність, т/рік	Рік введення	Примітки (джерело)
Nucor Crawfordsville (США)	CSP (SMS group)	Гарячекатаний рулон	1 500 000 (1 лінія)	1989	Перший CSP-модуль у світі
Acciaieria Arvedi (Італія)	ESP (Primetals/Arvedi)	Гарячекатаний рулон	2 000 000 (1 лінія)	2009	Безперервний прокат, товщина від 0,8 мм
Shougang Jingtang (Китай)	DUE (Danieli)	Гарячекатаний рулон	4 200 000 (2 лінії)	2014	Дві паралельні лінії по ~2,1 млн т
Rizhao Steel (Китай)	ESP (Primetals)	Гарячекатаний рулон	11 100 000 (5 ліній)	2017–2019	П'ять ліній: 3×2,55 + 2×2,0 млн т
NMDC Nagarnar (Індія)	QSP (Danieli)	Гарячекатаний рулон	2 900 000 (2 лінії)	2023	Товщина 1–16 мм; 2 вертикальні МНЛЗ

ЛПМ для листового прокату (товстолист та пластина)

Виробництво товстолистого прокату (пластини завтовшки >16 мм) зазвичай здійснюється на окремих реверсивних станах після різання та повторного нагріву слябів. Проте концепція лиття-прокатки застосовується і в цьому сегменті – через комбіновані рішення на основі тонкого сляба та універсальних станів. Приклад – технологія QSP® (Quality Strip Production) від Danieli, що поєднує тонкослябову МНЛЗ із прокатним станом Стекель (реверсивним з моталками) або розділеною групою чорнових і чистових клітей [32].

Такі агрегати дозволяють випускати як гарячекатані рулони, так і листи великої товщини на одному потоці. Зокрема, згаданий вище новий комплекс NMDC (Індія) оснащений двома вертикально-кривими МНЛЗ та станом 2+4 (дві чорнові + чотири чистові кліті) зі Steckel-моталками. Він прокочує як рулони товщиною 1–16 мм, так і листи (можливий мотунок гарячих рулонів вагою до 35 т, які потім розмотують і розрізають на лист) [32].

. Інший приклад – завод Algoma (Канада), де ще у 1997 р. було впроваджено Danieli QSP: тонкослябова розливка + двосторонній Steckel-стан для отримання листів трубного сортаменту та судової сталі. Схема зображена на рисунку 1.16.

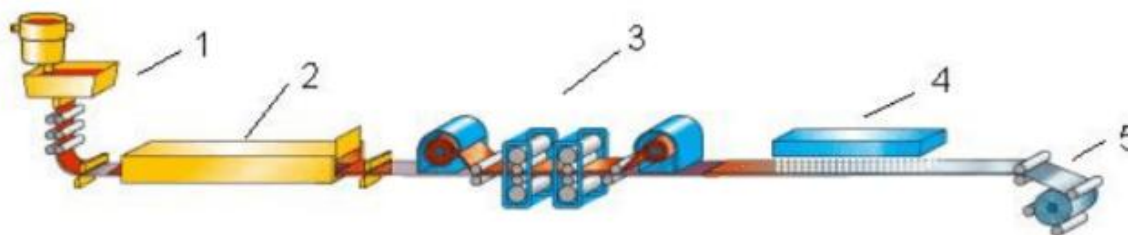


Рисунок 1.16 – Агрегат типу CSP з реверсивною прокатною кліттю: 1 — МНЛЗ; 2 — двопрохідна піч-накопичувач; 3 — реверсивна кліть; 4 — зона охолодження; 5 — моталка.

Варто зазначити, що повністю безперервна схема для товстолиста менш поширена, оскільки виробництво пластин потребує гнучкості за довжиною і індивідуальної термообробки листів. Натомість використовують підхід гарячої розрядки слябів: сляби з МНЛЗ не охолоджують до кімнатної температури, а з температурою $\sim 700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ надходять на нагрівальні рольганги або прямо в печі плаваючого типу перед товстолистовим станом. Таким методом, наприклад, ПАТ «Запоріжсталь» (Україна) обробляла частину слябів із нових МНЛЗ-№ 4, 5 (2013–2017 рр.) для скорочення витрат газу при прокатці товстого листа – але це ще не модуль «лиття-прокат» в повному розумінні.

Перспективним напрямком є безперервне лиття безпосередньо заготовок-пластин необхідної товщини, з мінімальною прокаткою. Такі рішення випробовуються для деяких марок сталі (наприклад, лиття смуги товщиною $\sim 20\text{--}30$ мм з подальшим гарячим плющенням на ~ 15 мм без додаткового нагріву). Однак масового впровадження подібні ЛПМ ще не набули.

ЛПМ для арматури і сортового прокату

Литейно-прокатні модулі для арматури, катанки та сортового прокату – це сучасні міні-заводи на основі безперервного лиття заготовок малого перерізу (блємів, слябів товщиною до 100 мм або квадратної заготовки $100\times 100\text{--}160\times 160$ мм) з подальшою прокаткою їх у прутки або бунти. Часто такі комплекси називають мікроміллами (від англ. Micromill). Вони працюють переважно на електросталеплавильній базі (дугова або індукційна піч) і орієнтовані на випуск до $\sim 0,5\text{--}1,0$ млн тонн сортової продукції на рік [32].

Технологічні рішення для цього сегмента включають: короткі МНЛЗ з високошвидкісною розливкою сортової заготовки, її пряме подавання (або через індукційний підігрівач) у безперервний прокатний стан дрібносортного або середньосортного профілю, систему швидкісного охолодження і укладки прокату. Важлива риса – endless rolling, тобто безперервна прокатка потоку металу від МНЛЗ без пауз на зміну штаб або мотка [23].

. Цього досягають двома способами: литтям безперервної нескінченної заготовки з «м'яким» розрізанням на виході (так працюють установки Danieli MIDA QLP, де заготовка товщиною ~130 мм тягнеться безперервно через 16 клітей до готового прутка) [23].

, або технологією зварювання заготовок «початок-к-кінцю» (система EBROS, розроблена Primetals, що зварює торці послідовних заготовок і таким чином утворює безперервний потік на дротовому стані). Безперервність прокатки дозволяє підвищити швидкість випуску (до 40–50 м/с для дроту) і мінімізувати втрати тепла.

Приклади мікромілів:

CMC Steel Arizona (США) – перший мікроміл Danieli MIDA, запущений у 2009 р., продуктивність ~250–300 тис. т арматури на рік. Аналогічна друга лінія збудована для CMC у штаті Оклахома (2017 р., 350 тис. т/рік) [32]. Обидва заводи випускають арматурні прутки №4–№11 (діаметром 12–36 мм) та катанку, частину продукції змотують у мотки (технологія Danieli K-Spool).

Nucor Sedalia & Frostproof (США) – мікрозаводи компанії Nucor, запущені у 2020 р. в штатах Міссурі та Флорида. Потужність кожного – ~380 тис. т сортового прокату на рік (№3–№11 арматура). Оснащені електропідігрівом Quantum і безперервним литтям-прокаткою від Danieli.

Pacific Steel (США) – будується новий MIDA-модуль у м. Мохаве (Каліфорнія) для виробництва арматури й катанки, 380 тис. т/рік. Проект «зеленої» міні-СТАЛЕЛИВАРНІ отримав контракт у 2023 р., запуск очікується 2025-го [23].

Emirates Steel (ОАЕ) – великий комплекс (завод у Абу-Дабі) на базі двох дугових печей і трьох МНЛЗ, що гарячим чином заряджають заготовки у три сортові стани. Випускає ~2,5 млн т арматури, катанки і дроту на рік для будівництва.

Algerian Qatari Steel (Алжир) – новий металургійний завод (запуск 2019 р.) з двома електропечами та модулем Danieli MIDA. Розрахований на ~2,0 млн т на рік будівельної сталі (арматура різних діаметрів) [32].

В Україні найсучаснішим прикладом наближеним до концепції лиття-прокат є завод «Електросталь» (Курахово), відкритий у 2012 р. Це міні-завод з дуговою піччю (30 т), двоструменевою МНЛЗ для квадрата 120 мм та прокатним станом (лише чорнові кліті). Хоча там застосовується проміжне охолодження заготовок, завод працював за укороченою схемою, випускаючи ~300 тис. т арматури і кутників на рік. Після 2014 р. підприємство опинилося в зоні бойових дій і нині не діє. Інші українські меткомбінати впроваджували елементи ЛПМ для сортового прокату: так, на «АрселорМіттал Кривий Ріг» у 2017 р. введено МНЛЗ-2 для заготовок 130×130 мм, продуктивністю до 1 млн т/рік, і модернізовано дротяний стан № 2 з установленням печі СПЗ (стапельного пічного завантаження) для гарячого прокату без повного охолодження заготовки [33]. Подібну технологію гарячого заряджання планували реалізувати й на «Єнакієвському метзаводі» (ЄМЗ) та Макіївському філіалі (обидва на окупованій території) – ці підприємства мали нові МНЛЗ

(2010–2012 рр.) та прокатні стани для балок і фасонного профілю, поставлені фірмою Danieli. У таблиці 1.13 наведено приклади діючих мікроміллів для арматурно-сортового прокату.

Таблиця 1.13 — Приклади діючих мікроміллів для арматурно-сортового прокату

Підприємство (країна)	Технологія	Продукція	Потужність, т/рік	Рік введення	Примітки (джерело)
СМС Arizona (США)	MIDA Micromill (Danieli)	Арматура в прутках Ø10–36 мм	280 000	2009	Перша безперервна мікросталеплавильня
СМС Oklahoma (США)	MIDA Micromill (Danieli)	Арматура в прутках Ø10–32 мм	350 000	2017	Модуль “неперервного лиття-прокат”
Nucor Sedalia (США)	QLP® (Danieli)	Арматура, катанка	380 000	2020	Безперервна розливка і прокатка
Emirates Steel (ОАЕ)	ECR® (Primetals)	Арматура, катанка, дріт	2 500 000	2012	Гаряче зарядження заготовок
Algerian Qatari Steel (Алжир)	MIDA QLP (Danieli)	Арматура (№8–40), катанка	2 000 000	2019	Повний цикл: ЕДП, МНЛЗ, безперервний стан

ЛПМ для фасонного прокату (кутник, швелер, балка тощо)

Виробництво великого фасонного прокату (двотаврових балок, швелерів, рейок) також інтегрується з МНЛЗ шляхом лиття блумів або блюмсів спеціальної форми. Сучасні машини неперервного лиття можуть відливати так звані beam blank – заготовки профілю «собачка» (двотавровий переріз з перемичкою), максимально наближені до форми готової балки [31] цьому кількість проходів на прокатному стані суттєво скорочується, а вихід металу зростає. Beam-blank лиття вперше впроваджене у 1968 р. (Algoma, Канада) [14], а з 1980-х набуло поширення в Європі (заводи JFE, Nippon Steel та ін.). Дослідження показали, що пряме використання перетинів типу «dog-bone» зменшує чернові прокатні операції ~вдвічі та підвищує продуктивність стана на ~15% [14].

У технологічному плані литейно-прокатний модуль для фасонного профілю виглядає як стандартний EAF/BOF + МНЛЗ + сортопрокатний стан, але з особливостями: МНЛЗ забезпечена кристалізатором під профільну заготовку (наприклад, «двотавр» 300×100 мм), а прокатний стан – укороченою групою клітей (кілька чорнових універсальних + чистова універсальна і кантівна кліті) [14]. Зазвичай між МНЛЗ і станом встановлюють печі-підігрівачі для вирівнювання температури по перетину, особливо у товстих елементах профілю (полиці балки). Далі прокат йде за традиційною схемою. Таким чином, модулі для фасонних профілів рідко бувають повністю «безперервними», але гаряча подача заготовок з лиття на прокатку дозволяє економити до 8% палива і 55% енергії на черновій обжимці [14], а також знизити капзатрати стану (~–30% на меншу кількість клітей) [14].

Світові приклади:

Gerdau Corsa (Мексика) – міні-завод (2015 р.) з електропіччю, МНЛЗ для блюмсів/beam-blank і прокатним станом на середні секції. Потужність ~1,0 млн т, випускає двотаврові балки, швелери, спецпрофілі [14].

Hyundai Steel Danjin (Корея) – металургійний завод, де встановлено дві МНЛЗ для блюмів і блюмсів (виробництва Primetals) на лінію прокатки широкополочних балок (стан Universal mill). Виробництво важких Н-балок до 900 мм висотою, рейок та шпунта, сумарно ~1,5 млн т на рік.

Evrz Pueblo (США) – рейкобалковий стан, модернізований у 2021 р. із впровадженням МНЛЗ для круглого блюма Ø230 мм. Рідка сталь з ЕДП відливається у цю заготовку, яка гарячою передається в методичну піч перед станом. Це скоротило цикл виготовлення рейок і дозволило підвищити гнучкість виробництва.

В Україні сегмент фасонного прокату історично працював по повній схемі (з литтям злитків, згодом МНЛЗ блюмів та подальшим прокатуванням після нагріву). На комбінаті «Азовсталь» з 2011 р. діяла МНЛЗ № 6 для блюмів 400×300 мм під двотаврову балку, але прокат вівся на окремому стані після повторного нагріву. Компанія «МЕТІН-ВЕСТ» у 2013–2014 рр. встановила сучасну МНЛЗ на «Єнакієвському МЗ» для фасонних заготовок (балочний блюмс), проте через військові дії проект налагодження лиття-прокатки не був завершений. В майбутньому, із відновленням металургії, українські підприємства можуть впровадити повноцінні литейно-прокатні модулі для рейок і балок – з урахуванням світового досвіду енергозбереження та оптимізації.

Постачальники технологій. Ринок литейно-прокатних модулів поділений між кількома великими компаніями. SMS group (Німеччина) –

розробник оригінальної CSP-технології, має десятки реалізацій CSP по всьому світу [31]. Primetals Technologies (Австрія/Японія) – спільна компанія Siemens-VAI і Mitsubishi, пропонує рішення Arvedi ESP для рулонів та ECR (Endless Casting Rolling) для довгомірних виробів. Danieli (Італія) – лідер у сегменті міні-заводів, має комплексні продукти: Micromill MIDA для арматури, QSP/DUE для тонкого листа, QLP для сортового прокату тощо [32]. Крім того, в ніші спеціальних технологій працюють Novelis (Алусуїсе) – twin-roll лиття алюмінію, Steel Plantech (Японія) – конвеєрні міні-МНЛЗ, IHI/VAI – Castrip (валкове лиття тонкої смуги). Вибір постачальника залежить від продуктового профілю: для арматурних заводів домінує Danieli (близько 85% міні-міллів у світі мають обладнання Danieli [32]), для тонкого рулону конкурують SMS (CSP) і Primetals (ESP). У ряді випадків, як-то на китайських комбінатах, будуються гібридні лінії із застосуванням місцевого обладнання при ліцензійній підтримці західних інжинірингових фірм.

1.7. Сучасні машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) у світі

Безперервне лиття сталі – це процес, при якому рідкий метал безперервно твердне у водоохолоджуваному кристалізаторі, утворюючи заготовки необмеженої довжини (так звані сталеві «слитки»), які потім ріжуться на потрібну довжину [15]. Сьогодні цей метод виробництва практично витіснив розливання в зливки: близько 95% світової сталі виробляється на МБЛЗ [28], що дозволило суттєво зменшити витрати металу (обрізки кінців злиwkів при розливі в форми раніше сягали 15–25% [15]) та покращити якість і однорідність структури металу по довжині заготовки. Сучасні установки безперервного розливання сталі експлуатуються в більшості металургійних країн світу – зокрема, Японія, США, Китай, Німеччина, Корея належать до лідерів з виплавки слябів

на МБЛЗ [15]. Основними виробниками обладнання для МБЛЗ є спеціалізовані інжинірингові компанії: SMS Group (SMS Concast), Primetals Technologies (об'єднала досвід Siemens VAI та Mitsubishi), Danieli, Steel Plantech та інші, чії установки працюють на металургійних комбінатах по всьому світу (наприклад, Nippon Steel, JFE, Kobe Steel, Baosteel, POSCO, US Steel, ArcelorMittal тощо) [22].

Класифікація та типи МБЛЗ заготовок

Машини безперервного лиття класифікують за різними ознаками. За конструкцією траєкторії розливання розрізняють вертикальні, кривоолінійні (радіальні) та горизонтальні МБЛЗ [15]. Найбільш поширені кривоолінійні машини, де затверділий струмок згинається горизонтально для зручності подальшого транспортування. За кількістю одночасно литих ниток (“ручаїв”) установки бувають від одноструменевих до багатоструменевих (типово 1–8 ниток) [15]. Типову МБЛЗ зображено на рисунку 1.17



Рисунок 1.17 - Типова кривоолінійна МБЛЗ

Відповідно до геометрії та розмірів отримуваної заготовки виділяють слябові МБЛЗ (для товстих широких слябів), блюмові МБЛЗ (для великих квадратних/прямокутних блюмів) та сортові МБЛЗ (для дрібнішої сортової заготовки) [15]. Нижче розглянуто сучасні сортові та слябові машини, їх особливості та характеристики, а також типи перерізів заготовок (круглі, квадратні, ромбоподібні), які вони відливають.

Сортові машини безперервного лиття (для сортового прокату)

Сортові МБЛЗ призначені для безперервного лиття відносно невеликих перерізів: це можуть бути квадратні або круглі заготовки (так звані біллети і блюми) зі стороною або діаметром зазвичай від ~100 мм до ~300 мм [28]. На рисунку 1.18 зображено квадратний білет.



Рисунок 1.18 - Квадратний білет.

Іноді до сортових також відносять фасонні профілі, наприклад beam-blank (двотавровий профіль для прокатки балок) або інші близькі до кінцевої форми перерізи, що дозволяють зекономити енергію на прокаті [29]. Сучасні сортові машини зазвичай мають декілька ниток

лиття для підвищення продуктивності – поширені 4–6-струменеві МБЛЗ, а для невеликої квадратної заготовки (100–150 мм) можуть застосовуватися машини з 8 і навіть 12 нитками одночасно [32]. Наприклад, компанія Danieli пропонує багатоструменеві установки FastCast з радіусом кривизни ~10 м, здатні литвом по 12 ниток виробляти до 2,4 млн тонн сортових заготовок на рік (продуктивність до 75 т/год на одну нитку) [32]. Щоб забезпечити якість при такій високій продуктивності, застосовуються новітні технології: мідні кристалізатори спеціальної конструкції (напр. CONVEX/INVEX), гідравлічні коливальні системи, електромагнітне перемішування металу (EMS) в зоні кристалізації та динамічне «м'яке» обтиснення (Soft Reduction) валками для попередження усадки і центральної сегрегації [32].

Кругла безперервнолита заготовка використовується переважно для виробництва труб (безшовні труби через прошивання) або для подальшого кування (наприклад, колісні бандажі, рейкові колеса, ротори тощо). Діаметр таких заготовок може суттєво варіювати: сучасні МБЛЗ здатні відливати круглі білети малих діаметрів (100–200 мм) для катанки і трубних заготовок, середніх діаметрів (220–400 мм) для коліс і великих труб, а також великі круглі блюми діаметром 430–500 мм і більше. Наприклад, на комбінаті НКМ (Німеччина) експлуатується установка для лиття круглих блюмів діаметром 430 мм [15], а на новітньому заводі Інтерпайп Сталь (Україна) працюють одразу дві круглоблюмові МБЛЗ: п'ятиструменева – для діаметрів 150–290 мм (швидкість лиття до 3,4 м/хв, продуктивність ~770 тис. т/рік), та чотириструменева – для великих діаметрів 385–495 мм (швидкість до 0,68 м/хв, продуктивність ~550 тис. т/рік) [35]. Таким чином, зі зростанням діаметра темп

розливання знижується задля повного протвердження серцевини і уникнення внутрішніх дефектів. Слід зазначити, що граничні розміри круглої заготовки постійно зростають завдяки удосконаленню обладнання: 1200 мм – вже нині доступний діаметр круглого блюму, а перша машина для лиття гігантських круглих блюмів $\varnothing 1300\text{--}1600$ мм (вертикальна, напівбезперервної дії) запланована до запуску як альтернатива колишньому зливковому способу отримання великих ковальських заготовок [32].

Квадратна сортова заготовка (біллети і блюми)

Квадратна заготовка – найпоширеніший тип продукту сортових МБЛЗ. Невеликі квадратні біллети перерізом напр. 100×100 мм, 120×120 мм чи 150×150 мм є сировиною для прокату арматури, катанки, профілів та інших довгомірних виробів. Типовий діапазон розмірів квадратних заготовок – від ~ 85 мм до ~ 200 мм [28]. В цій категорії сучасні машини досягли винятково високої продуктивності: зокрема, SMS Concast повідомляє про успішний запуск п'ятиструменевої МБЛЗ для квадратів 180×180 мм на заводі Saerstahl AG (Німеччина) з проектною потужністю 850 тис. тонн на рік [28]. Ця машина обладнана новітніми технологіями – від вдосконаленого мідного кристалізатора (CONVEX) до систем електромагнітного перемішування та механічного м'якого обтиснення (вперше у світі реалізованого саме на квадраті 180 мм на МБЛЗ Saerstahl) для досягнення високої внутрішньої якості сталі [28]. Для дрібних квадрантів (100–130 мм) провідні виробники обладнання також реалізували технології високошвидкісного лиття – понад 3 м/хв. Зокрема, Steel Plantech (JFE) повідомляє про стабільне лиття на швидкостях понад 3,0 м/хв і отримання >200 тис. тонн на місяць з однієї нитки (що відповідає $\sim 2,4$ млн т/рік з однієї нитки при багатонитковій

схемі) [36]. Досягти цього дозволяє поєднання сучасних систем контролю: автоматичне підтримання рівня металу в кристалізаторі, електрогідравлічні коливальні механізми (для мінімізації тертя та прилипань металу) [36], інтелектуальні системи вторинного охолодження і м'якого обтиснення для запобігання утворення усадкової раковини та центральної сегрегації [36]. Приклади установок: квадратні сортови МБЛЗ широко застосовуються на металургійних комбінатах світу – від електрометалургійних міні-заводів до інтегрованих комбінатів. Серед відомих постачальників – згадані SMS Concast, Danieli, Primetals, Steel Plantech, які мають референції в Європі, Азії та Америці (наприклад, Cherepovets Steel в Європі, POSCO Gwangyang в Кореї, Nucor Steel у США тощо – усі оснащені багатоструменевими МБЛЗ для квадратної заготовки) [36].

Ромбоподібна заготовка (діагонально орієнтований квадрат)

Термін «ромбовидна» заготовка зазвичай означає квадратний переріз, орієнтований під 45° (на кшталт ромба). Спеціально відливати заготовку в ромбічній орієнтації можуть для певних цілей (наприклад, при подачі на прокат кути ромба стають горизонтально-вертикальними граннями, що може полегшувати захват валками). Однак у сучасній промисловій практиці ромбічний переріз радше розглядається як похибка геометрії квадратної заготовки – так звана ромбічність (різниця довжин діагоналей квадрату) [37]. Висока ромбічність небажана, бо вона свідчить про деформацію заготовки при нерівномірному охолодженні і може викликати проблеми при прокатці (нерівномірне навантаження на валки та дефекти профілю) [37]. Тому виробники МБЛЗ впроваджують системи контролю температурного поля і вирівнювання охолодження, щоб мінімізувати відхилення форми заготовки від ідеального

квадрату [37]. Таким чином, специфічних сучасних МБЛЗ, що цілеспрямовано формують «ромбовидний» профіль, практично не існує – натомість підтримується точна прямокутна геометрія. В історичному контексті деякі комбіновані блюмові МБЛЗ могли відливати як квадратні, так і прямокутні заготовки з невеликим відношенням сторін, що іноді називали «ромбовидними» за їх близьку до квадрату форму. Проте сьогодні такі продукти відносять до блюмів або великої сортової заготовки.

1.8. Слябові машини безперервного лиття (для лиття слябів)

Слябові МБЛЗ призначені для отримання широких та плоских заготовок – сталевих слябів, які слугують проміжним продуктом для прокатки листів, пластин і товстолистового прокату. Сляб має прямокутний переріз значно більшої ширини, ніж товщини: зазвичай товщина слябів становить від ~120 мм до 300 мм (у звичайних технологіях), ширина – від ~0,7 до 2 метрів [36]. У сучасних умовах розвинуті також технології лиття тонких слябів (товщина 50–100 мм) для безперервного прокатування смуги, а також надтовстих слябів (350–600 мм) для спеціальних цілей [36]. Конструктивно слябові машини зазвичай є одноструменевими або двохструменевими (1–2 нитки), оскільки кожен сляб має велику ширину і потребує окремої широкої стрічки машинного потоку. Проте нещодавно з'явилися унікальні рішення: так, у 2023 році в Китаї запущено першу у світі триструменеву слябову МБЛЗ від Primetals, яка здатна замінити дві звичайні двохструменеві, економлячи 50% площі та знижуючи капітальні й експлуатаційні витрати [29]. Ця 3-ниткова машина має радіус вигину 8 м, довжину зони затвердіння ~40 м, розрахована на товщину слябу 210 мм, ширину 750–1100 мм, зі швидкістю лиття до 2,5 м/хв [29]. Завдяки спеціальному розподільчому ковшу

(tandish) і трьом паралельним кристалізаторам, така установка досягла стабільної роботи та високої якості поверхні й центру слябу (застосовано інтелектуальні осцилятори DynaFlex, системи рівня LevCon, вторинного охолодження DynaJet, динамічного м'якого обтиснення DynaGap SoftReduction 3D тощо) [29].

Принцип роботи слябової МБЛЗ. Розливання слябів може здійснюватися за вертикальною, радіально-криволінійною або комбінованою схемою. Історично перші МБЛЗ для слябів були вертикальними: рідка сталь розливалася зверху вниз, а затверділий сляб виходив вертикально і відрізався, що забезпечувало найвищу якість (відсутність вигину гарячого струмка) [29]. Недоліком була велика висота установки і складність вилучення слябів, тому пізніше набули поширення криволінійні (радіусні) машини – сталь спочатку твердне у вертикальному водоохолоджуваному кристалізаторі, потім ще в напівтвердому стані плавно згинається по дузі заданого радіуса до горизонтального напрямку. Класичний радіус криволінійних слябових МБЛЗ – 8–12 метрів, хоча для товстих слябів застосовують і більші радіуси (наприклад, 16–20 м), щоб зменшити деформацію. Основні вузли слябової машини: розливний стояк (сталерозливний ковш на поворотній башті), з якого метал через проміжний ковш (тандіш) подається в один або кілька мідних кристалізаторів прямокутного перерізу. Кристалізатор охолоджується водою; в нього зверху постійно надходить рідка сталь, і на його стінках миттєво утворюється тверда оболонка сляба. Далі за кристалізатором розташована зона вторинного охолодження – багатосекційна машина з роликками і розпилювачами води/повітря, де сляб рухається і поступово твердіє до серцевини [15]. При криволінійному розливі сляб у цій зоні поступово відхиляється від вертикалі до горизонталі, проходячи

через систему вигинальних і випрямних роликів. Повністю затверділий сляб на виході спрямовується по роликовому столу до газокисневих ножиць, де його розрізають на задану довжину (звичайно 6–12 метрів). Потім сляби маркируються і прямують або на склад охолодження, або на гарячий транспорт до стану гарячої прокатки (якщо передбачена технологія «hot charge»). [32]. На рисунку 1.19 зображено модернізовану слябову машину компанії SMS group.



Рисунок 1.19 - Двоструменева слябова машина компанії SMS group, модернізована компанією Danieli. Економічні та технічні характеристики. Слябові машини є потужними високопродуктивними агрегатами: типова одноструменева МБЛЗ здатна випускати 1–2,5 млн тонн слябів на рік [32]. Наприклад, установка від Primetals для китайської Baowu Steel матиме проектну потужність 1,9 млн т/рік з радіусом 10 м [29]. На рисунку 1.20 зображено одноструменеву МБЛЗ.

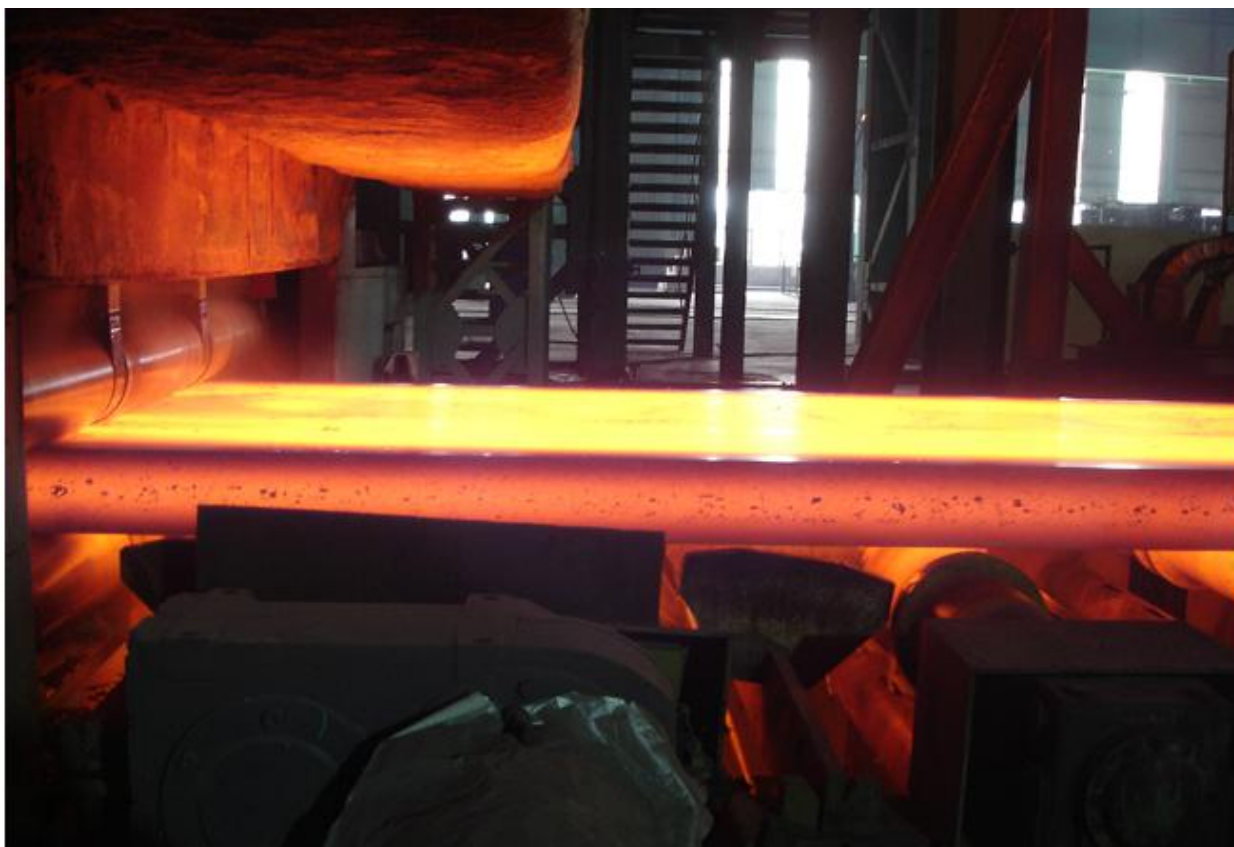


Рисунок 1.20 — Одноструменева слябінгова МБЛЗ

Якщо комбінат потребує більшого випуску, встановлюють декілька машин – так, Danieli повідомляє про проектування інтегрованих комплексів слябових МБЛЗ сумарною продуктивністю до 10 млн т/рік [32]. Швидкість лиття сляба залежить від товщини: стандартні 200–250 мм сляби ллють на швидкості $\sim 1,5\text{--}2,0$ м/хв; тонкі сляби (90–100 мм) – швидше (до 6–8 м/хв у установки FTSC від Danieli) [32], а надтовсті (350–400 мм) – повільніше ($\sim 0,7\text{--}1,0$ м/хв). Проте загальний тренд – підвищення швидкостей завдяки покращеному охолодженню: сучасні слябові МБЛЗ забезпечують стабільне лиття >3 м/хв навіть для стандартних товщин, при цьому одна нитка може видавати >200 тис.

тонн продукції на місяць [36]. Зростання швидкості і продуктивності досягається без втрати якості завдяки впровадженню цілого комплексу технологічних рішень: автоматизовані системи рівня металу і коливання кристалізатора, порошкової суміші для змащення та теплоізоляції, електромагнітне гальмування потоку в кристалізаторі для рівномірної структури, вторинне охолодження з адаптивним водяним зрошенням (зональне регулювання інтенсивності по довжині сляба) [36], а також Dynamic Soft Reduction – динамічна система пресування ще не до кінця затверділого сляба між валками, щоб запобігти усадковій порожнині та внутрішній сегрегації домішок [36]. Застосування цих рішень дозволяє отримувати сляби високої внутрішньої якості навіть з важкодеформівних сталей (наприклад, нержавіючі, підшипникові, трубні марки тощо).

Приклади та постачальники. Практично кожен великий металургійний завод у світі оснащений однією чи кількома слябовими МБЛЗ. Серед виробників обладнання для них – SMS group (Німеччина), Danieli (Італія), Primetals (Японія/Австрія), Steel Plantech (Японія), CMI/Fives та інші. Наприклад, Danieli Davy Distington (підрозділ Danieli) тісно співпрацював з такими гігантами, як Tata Steel, POSCO, Thyssenkrupp, Nucor, Baosteel, ArcelorMittal, US Steel – на їхніх комбінатах реалізовано проекти впровадження сучасних слябових МБЛЗ, у тому числі з прогресивними технологіями (гідрравлічні осцилятори Q-INMO, автоматизовані системи Q-COOL, Q-LEVEL, роботизація тощо) [32]. Японська Steel Plantech (JFE) за десятиліття роботи поставила свої слябові машини на всі основні металургійні підприємства Японії, а також до Китаю, Кореї, США, Мексики, Бразилії, Туреччини та інших країн [36]. Продуктивність та ефективність сучасних слябових МБЛЗ

добре ілюструє приклад комбінату Shougang Jingtang (Китай), де встановлено установку від SMS груп із продуктивністю $\sim 1,2$ млн т/рік, товщиною сляба 150–180 мм і швидкістю лиття до 2,5 м/хв [38]. Такі машини забезпечують високу вихідну якість слябів для подальшої прокатки, а також сприяють зниженню витрат енергії: безперервний процес дозволяє подавати сляби на прокатний стан ще гарячими, економлячи пальне на повторний нагрів. Крім того, автоматизація та вдосконалення конструкцій зменшують простой на обслуговування (цілі «безлюдні» ділянки із застосуванням роботів для обробки ковшів, подачі порошку тощо вже впроваджуються на нових МБЛЗ [32]). Все це робить сучасні МБЛЗ ключовою ланкою ефективного та гнучкого виробництва сталі у світі.

1.9. Сучасні підходи до менеджменту на металургійних підприємствах

Стратегічний менеджмент

Збалансована система показників (Balanced Scorecard) – один із провідних сучасних підходів до стратегічного управління, розроблений Р.Капланом і Д.Нортоном. BSC допомагає перетворити стратегію на конкретні цілі та показники за чотирма перспективами: фінанси, клієнти, внутрішні процеси, навчання і розвиток персоналу [15]. Такий підхід дозволяє врахувати не лише фінансові результати, а й нематеріальні активи (компетенції співробітників, відносини з клієнтами, корпоративну культуру тощо) – критично важливі фактори довгострокового успіху компанії [15]. Впровадження BSC робить діяльність підприємства більш прозорою і керованою, значно розширюючи можливості стратегічного управління [15]. Наприклад, металургійні компанії використо-

вують BSC для узгодження виробничих цілей із фінансовими та ринковими показниками: це дозволяє одночасно підвищувати ефективність процесів і орієнтацію на потреби клієнтів та акціонерів.

Інші сучасні підходи до стратегічного менеджменту включають сценарне планування та бенчмаркінг. Сценарний підхід допомагає підготуватися до різних варіантів розвитку ринку, а бенчмаркінг – переймати найкращі світові практики, порівнюючи показники свого підприємства з лідерами галузі [15]. Це особливо актуально в сталій промисловості, де глобальна конкуренція висока і важливо орієнтуватися на передовий досвід зарубіжних металургійних компаній (окрім РФ, як зазначено).

Операційний менеджмент

Ощадливе виробництво (Lean manufacturing) – концепція операційного менеджменту, спрямована на усунення всіх видів втрат і підвищення продуктивності. Витоки Lean – у системі виробництва Toyota, де прагнули залучити кожного співробітника до безперервного вдосконалення і виготовляти продукцію точно під запити споживачів з мінімальними затратами [15]. Lean забезпечує довготривалу конкурентоздатність без значних капіталовкладень, шляхом постійного покращення процесів і максимального використання ресурсів [15]. Цей підхід широко використовується в усьому світі: майже 100% японських виробників, 72% компаній у США та понад половина британських – впроваджують Lean, тоді як в Україні поки що лише поодинокі компанії займаються ощадливим виробництвом [15]. У металургії Lean-методи застосовують для скорочення простоїв обладнання, оптимізації запасів сировини і продукції, підвищення якості та швидкості виробничих проце-

сів. Наприклад, металургійні комбінати впроваджують 5S (система організації робочого місця) і Kanban для управління потоками матеріалів, що знижує втрати часу й матеріалів.

Шість сигм (Six Sigma) – методологія менеджменту якості та процесів, що ставить за мету зменшення дефектів і коливань у виробництві. Six Sigma – це стратегічний підхід до вдосконалення бізнесу, який через аналіз даних виявляє кореневі причини браку та варіацій і усуває їх, фокусуючись на показниках, критично важливих для споживача [15]. Метод виник у компанії Motorola (1986), а нині його успішно застосовують світові корпорації на кшталт Honeywell та General Electric [15]. У практиці металургійних заводів інструменти Six Sigma використовуються для контролю якості продукції (напр., сталі певних марок) – досягаючи рівня дефектності менш ніж 3,4 на мільйон операцій [15]. Це дозволяє суттєво знизити відходи і витрати переробки браку на сталеливарних виробництвах. Методи Six Sigma часто поєднують з Lean (підхід Lean Six Sigma) для одночасного усунення втрат і підвищення стабільності процесів.

Тотальне управління якістю (TQM) – ще один глобально визнаний підхід операційного менеджменту, заснований на залученні всіх працівників до постійного покращення якості продукції і процесів. Багато металургійних підприємств сертифіковані за стандартами ISO 9001 (системи управління якістю) [15], що підтверджує дотримання ними принципів процесного підходу, циклу Демінга (PDCA) та орієнтації на задоволення вимог замовників. Наприклад, український завод “Азовсталь” свого часу впровадив систему якості ISO, щоб відповідати суворим вимогам автомобільної галузі до металопрокату.

Інші практики операційного менеджменту, актуальні для металургії: тотальне продуктивне обслуговування (TPM) – система попереджувального ремонту обладнання для усунення простоїв, теорія обмежень – фокус на управлінні “вузькими місцями” виробництва, ощадлива логістика – мінімізація запасів по всьому ланцюгу постачання [15], реінжиніринг бізнес-процесів – радикальне спрощення і автоматизація технологічних та управлінських процесів тощо [15]. Усі ці підходи спрямовані на підвищення ефективності роботи металургійного підприємства: скорочення циклу виробництва, зниження собівартості та гнучке реагування на зміну попиту.

Фінансовий менеджмент

Сучасний фінансовий менеджмент в промислових компаніях зміщується від суто бухгалтерського обліку до управління вартістю бізнесу та інвестицій. Запроваджуються концепції Value-Based Management – управління, орієнтоване на зростання вартості для акціонерів, із використанням показників на кшталт економічної доданої вартості (EVA) та ринкової доданої вартості (MVA) [15]. Такі метрики дозволяють оцінити, наскільки підприємство реально створює нову вартість, а не лише отримує бухгалтерський прибуток. Так само популярні показники Total Shareholder Return (TSR) – сукупної акціонерної дохідності, що враховує зміну ринкової капіталізації компанії. В металургії ці підходи використовуються для обґрунтування інвестицій у модернізацію: приміром, розраховується EVA від впровадження нового прокатного стану чи екологічного фільтру, щоб показати довгострокову вигоду для компанії.

Інструмент *Balanced Scorecard*, згаданий вище, теж пов'язує фінансові цілі з оперативними та інноваційними завданнями. Він допомагає фінансовим менеджерам збалансувати короткострокові фінансові результати з довгостроковими інвестиціями у розвиток – клієнтські відносини, персонал, нові технології [15]. Це критично важливо в сучасній металургії, де значні кошти вкладаються в оновлення обладнання, екологічні заходи та R&D. Система фінансового контролінгу на підприємствах галузі все частіше включає бюджетування на основі діяльності (ABB) та калькулювання собівартості за видами діяльності (ABC) – щоб точно визначати витрати на кожен технологічний процес і шукати резерви економії.

Додатково, металургійні компанії дотримуються міжнародних стандартів фінансової звітності (IFRS) і розкриття інформації, впроваджують системи ERP (*Enterprise Resource Planning*) для інтеграції фінансових даних з виробничими, що підвищує прозорість і швидкість прийняття рішень. Сучасний фінменеджмент також приділяє увагу ризик-менеджменту: оцінюються валютні, сировинні ризики, коливання цін на сталь, і застосовуються хеджування та страхування для захисту фінансових результатів.

ІТ-менеджмент та цифровізація

В епоху Індустрії 4.0 інформаційні технології стали невід'ємною складовою управління виробництвом. Цифрова трансформація металургійних підприємств передбачає впровадження кіберфізичних систем, інтернету речей (IoT), великих даних та штучного інтелекту в заводські процеси [15]. Мета – створити «розумні фабрики», де обладнання автоматизоване і взаємопов'язане, а дані з датчиків у реальному часі аналізуються для оптимізації роботи [15]. Такий підхід дозволяє

прискорити і зробити гнучкішими виробничі процеси, підвищити якість продукції та знизити витрати [15].

Управління ІТ на підприємстві включає впровадження ERP-систем (для планування ресурсів), MES-систем (систем виконання виробництва), платформ моніторингу обладнання та аналітики. Сучасні сталеливарні компанії застосовують підходи ITIL та DevOps для ефективної експлуатації ІТ-сервісів і швидкої реалізації оновлень. Наприклад, на комбінаті ArcelorMittal Dofasco (Канада) впроваджено систему моніторингу стану прокатних станів з предиктивною аналітикою: датчики збирають інформацію про вібрації, температуру тощо, і алгоритми прогнозують поломки, що дозволяє завчасно планувати ремонт. Такі ініціативи – частина концепції predictive maintenance (прогнозного обслуговування) в межах Індустрії 4.0.

В Україні теж розпочато цифровізацію металургії: Інтерпайп у 2020 році реалізував пілотний проект з елементами Промисловості 4.0 [15]. На підприємствах групи METINVEST запроваджуються системи онлайн-моніторингу виробництва, автоматизації складів і збуту продукції. Управління такими ІТ-проєктами потребує тісної співпраці ІТ-департаменту з виробничими підрозділами, гнучкого планування (Agile-підходи в управлінні ІТ-проєктами) та належної кібербезпеки.

Управління персоналом (HR-менеджмент)

Людський капітал – ключовий ресурс сучасних промислових підприємств. Сучасні підходи до HR-менеджменту у металургії зосереджені на розвитку компетенцій працівників, мотивації та безпеці праці. Світова сталеливарна індустрія визнає, що успіх галузі нерозривно пов'язаний із різноманітністю та майстерністю її людей [39]. Тому пріоритетними є навчання і перепідготовка персоналу протягом усього

життя – особливо в контексті впровадження нових технологій та переходу до вуглецево-нейтрального виробництва [39]. Металургійні компанії (наприклад, Tata Steel чи US Steel) створюють корпоративні університети та центри навчання, де робітники освоюють сучасні методи роботи, цифрові навички, правила експлуатації нового обладнання тощо.

Важливим напрямом є формування культури безпеки. Металургія – потенційно травмонебезпечна галузь, тому підприємства прагнуть до нульового рівня травматизму (Zero Injury) [39]. Впроваджуються програми навчання з охорони праці, система повідомлень про небезпечні ситуації, мотивація працівників дотримуватися правил. Наприклад, ArcelorMittal Кривий Ріг реалізує програму “Safety First”, яка включає щоденні мітинги з безпеки, аналіз інцидентів і нагородження колективів без травм протягом року.

Управління ефективністю персоналу здійснюється через чіткі KPI та систему винагород. Сучасні підходи на зміну класичним оцінкам приходять OKR (Objectives and Key Results) – гнучке цілеутворення, що застосовується, зокрема, в проєктних підрозділах з автоматизації. Поряд із цим, підприємства запроваджують принципи залученості й розвитку талантів: програми кадрового резерву, конкурси раціоналізаторських ідей, корпоративні заходи для зміцнення командного духу. Така Lean-культура орієнтована на колективну роботу і постійні покращення – людський фактор в ній є визначальним [15]. Емоційний інтелект керівників, коучинг, підтримка інновацій і змін стали невід’ємними елементами HR-менеджменту успішних металургійних компаній [15].

Інноваційний менеджмент

Для збереження глобальної конкурентоспроможності металургійні підприємства активно розвивають інноваційний менеджмент. Це комплекс підходів до управління розробками нових продуктів, технологічними інноваціями та науково-дослідними роботами (R&D). Багато сталевиробників мають власні R&D-центри: наприклад, ArcelorMittal утримує мережу дослідницьких лабораторій у різних країнах, де створюються нові марки сталі (високоміцні, з полегшеною вагою для авто тощо) і вдосконалюються виробничі процеси (безвуглецеве виплавлення сталі, технології утилізації відходів).

Сучасний підхід – відкрита інновація: компанії співпрацюють із стартапами, університетами, постачальниками технологій, щоб спільно вирішувати складні технічні завдання. Наприклад, європейські металурги об'єдналися у проєкти з розробки «зеленої» водневої металургії (Hybrit, H2Steel) для декарбонізації сталеплавильного процесу. Інноваційний менеджмент також включає Stage-Gate процеси управління проєктами R&D – кожна нова ідея проходить стадії від відбору, тестування в лабораторії до пілотного впровадження у виробництві. Це дозволяє інвестувати ресурси в перспективні напрямки й вчасно відсіювати невдалі рішення.

В рамках інноваційного менеджменту металургійні компанії все більше уваги приділяють цифровим інноваціям: впровадженню цифрових двійників заводів, систем штучного інтелекту для оптимізації плавок, 3D-друку металевих деталей для ремонту обладнання тощо. Такі новації змінюють бізнес-моделі – з'являються послуги сервіталізації (напр., оренда виробничих потужностей «як сервіс») і нові продукти з доданою цінністю. Управління інноваціями потребує гнучкого підходу:

багато компаній запозичують Agile-методології (Scrum) для команд розробників, аби швидше отримувати результат і адаптуватися до зворотного зв'язку. Загалом, інноваційний менеджмент сьогодні – це поєднання внутрішнього наукового потенціалу і зовнішніх партнерств, підтримане корпоративною культурою, що заохочує творчість і прийняття змін [15].

Екологічний менеджмент

Дотримання екологічних норм і сталий розвиток – важливі складові менеджменту сучасної металургії. Екологічний менеджмент на підприємствах галузі базується на міжнародних стандартах серії ISO 14000 (системи екологічного управління) та принципах соціальної відповідальності (ESG – Environmental, Social, Governance). Провідні металургійні компанії світу впроваджують стратегії декарбонізації виробництва, повністю підтримуючи цілі Паризької угоди щодо зниження викидів парникових газів [39]. Вони інвестують у низьковуглецеві технології (перехід від доменних печей на вугіллі до електропечей та водневих установок прямого відновлення заліза), підвищують енергоефективність та переходять на відновлювані джерела енергії.

Окрім боротьби зі зміною клімату, екологічний менеджмент охоплює управління якістю повітря, водними ресурсами, відходами виробництва. Глобальна сталеливарна індустрія декларує прагнення до прозорості даних і постійного поліпшення екологічних показників – зокрема, скорочення споживання води, зменшення пилових і газових викидів, максимізація повторного використання ресурсів [39]. Для цього заводи обладнуються сучасними фільтрами, системами оборотного водопостачання, утилізаторами тепла від доменних газів тощо. Напри-

клад, ArcelorMittal сертифікувала більшість своїх комбінатів за стандартом ISO 14001 і щорічно публікує звіти сталого розвитку, де відслідковує прогрес у зниженні впливу на довкілля. В Україні металургійні підприємства також поступово впроваджують найкращі доступні технології (НДТ) для екологізації виробництва: встановлюються аспіраційні установки на конвертерах, модернізується коксове виробництво для зменшення викидів бензапірену тощо.

Сучасний екологічний менеджмент пов'язаний і з циркулярною економікою – все ширше використовуються відходи як вторинна сировина. Сталевари збільшують частку брухту в шихті для електрпечей, налагоджують переробку шлаків (у виробництві цементу, дорожнього будівництва), повертають очистлену воду в цикл. Це не тільки зменшує екологічне навантаження, а й економить витрати. Менеджери оцінюють екопроекти не лише з точки зору витрат, але й вигод: зменшення платежів за викиди, покращення іміджу компанії, виконання вимог міжнародних клієнтів щодо “зеленого” ланцюга постачання.

Менеджмент змін при впровадженні нових технологій

Перехід від старих технологій до новітніх потребує ретельного управління змінами. Сучасні моделі (наприклад, Дж. Коттера чи PROSCI ADKAR) пропонують структурований підхід: від формування усвідомлення необхідності змін до закріплення нововведень у корпоративній культурі. Для промислових підприємств, що модернізуються, критично врахувати такі аспекти:

Стратегія цифровізації та автоматизації: Керівництво має чітко визначити бачення цифрової трансформації – як нові ІТ-системи, роботи, автоматизовані лінії покращать бізнес-процеси. Важливо призначити лідера змін (Change Agent), який візьме відповідальність за проект

[15], та скомунікувати персоналу “чому” ці зміни потрібні (створити відчуття терміновості або навіть «кризу для змін» [15]). Наприклад, при впровадженні системи автоматичного управління прокатним станом компанія може обґрунтувати це необхідністю наздогнати конкурентів і уникнути втрати ринків.

Пілотування та поетапне впровадження: Замість різкого переходу бажано випробувати нові технології на окремій ділянці чи лінії, отримати перші успіхи (quick wins) і продемонструвати результат колективу [15]. Такий підхід знижує ризики і підвищує довіру персоналу до змін. Наприклад, спочатку запустити роботизоване зварювання на одному агрегаті, відпрацювати методику, а вже потім масштабувати на весь цех. При цьому необхідно оперативно інформувати працівників про досягнуті результати і вигоди (менша кількість браку, полегшення праці тощо) [15].

Перепідготовка і навчання персоналу: Перехід на цифрові технології неможливий без підвищення кваліфікації співробітників. Потрібно заздалегідь оцінити, яких знань бракує, і організувати навчальні програми – від тренінгів роботи з новими ІТ-системами до освоєння принципово нових професій (наприклад, оператор дронів для моніторингу кар'єрів або аналітик даних у виробництві). Світовий досвід показує: інвестиції у навчання кадрів для роботи на сучасному обладнанні – це інвестиції в успішність змін [39]. Компанії можуть співпрацювати з технічними університетами, запускати курси перекваліфікації для інженерів і робітників (наприклад, навчання ІТ-грамотності для працівників доменного цеху при впровадженні системи управління агрегатом).

Впровадження нових ІТ-систем та бізнес-процесів: Заміна старих систем (наприклад, паперових журналів обліку виробітку) на сучасні

ERP/MES платформи вимагає реінжинірингу бізнес-процесів. Менеджмент змін повинен проаналізувати й оптимізувати процеси до автоматизації, щоб не оцифрувати зайвих бюрократичних процедур. Рекомендується залучати кінцевих користувачів (майстрів, технологів) до розробки нових процесів – це підвищить їх прийняття. Перехід слід робити поступово: спершу паралельне ведення старої і нової систем, навчання ключових користувачів, потім повний перехід і вимкнення застарілих методів. Важливо мати план управління даними – перенести історичні дані, налаштувати інтеграцію між підсистемами.

Управління ризиками змін: Будь-яка технологічна модернізація несе ризики – зупинки виробництва, відставання від графіку, перевитрати бюджету, опір персоналу. Сучасний менеджмент застосовує проактивний ризик-менеджмент: на етапі планування змін ідентифікуються можливі ризики та розробляються плани дій на випадок їх виникнення. Наприклад, ризик відмови нового обладнання мінімізують через дублювання критичних вузлів або готовність повернутися тимчасово до старого процесу. Ризики саботажу з боку працівників знижують шляхом їх залучення та комунікацій. Кожен значний проект модернізації має включати матрицю ризиків з оцінкою їх впливу і ймовірності, а також відповідальних за реалізацію заходів реагування.

Комунікація і залучення людей: Прозора і відкрита комунікація – наріжний камінь успішного менеджменту змін. Працівникам всіх рівнів слід роз'яснити цілі та вигоди трансформації, чесно говорити про можливі труднощі. Важливо створити двосторонній зв'язок: вислухати зауваження колективу, відповісти на їхні питання, врахувати конструктивні пропозиції. Корисним є формування коаліції прихильників змін – за-

лучення неформальних лідерів виробництва, які своїм прикладом підтримуватимуть нововведення. Компанії часто проводять інформаційні сесії, демонстрації роботи нового обладнання, обмін досвідом з колегами з інших заводів, що вже пройшли подібний шлях. Це знижує страх невідомого та опір.

Культурна трансформація організації: Сталі зміни можливі лише за умови еволюції корпоративної культури. Необхідно закріпити в ній цінності інноваційності, гнучкості, орієнтації на постійне вдосконалення. Як зазначається в концепції Lean, без “ощадливої” (гнучкої, відкритої до покращень) культури неможливе ошадливе виробництво [15]. Менеджмент має заохочувати ініціативність, терпимо ставитися до конструктивних помилок під час навчання новому. Лідери змін повинні демонструвати своїми діями нові підходи – наприклад, керівництво відвідує навчальні тренінги разом із підлеглими, публічно визнає вклад команд, що успішно впровадили інновацію. Також важливо оновити систему мотивації: включити до KPI показники, пов’язані зі змінами (кількість ідей по вдосконаленню, економія від проектів тощо). Культурні зрушення закріплюються і неформально – історії успіху команд, що пройшли шлях модернізації, стають частиною корпоративної легенди, нові працівники проходять навчання в дусі цих цінностей.

Підсумовуючи, сучасний менеджмент змін – це комплексний процес, що поєднує лідерство, планування, роботу з людьми і технологіями. Успішні промислові компанії (і металургійні зокрема) підходять до модернізації системно: починаючи з візії та стратегії, через пілотні кроки і навчання персоналу, до культивування нового способу роботи.

Такий підхід дозволяє мінімізувати стрес і опір, забезпечити безперервність виробництва при змінах і максимально реалізувати потенціал нових технологій для зростання ефективності підприємства.

SWOT-аналіз (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) – це класичний, але й досі актуальний інструмент стратегічного аналізу, який у сучасних умовах трансформувався в гнучкий метод системної оцінки позиції підприємства на тлі динамічного ринку, технологічних змін і глобальних викликів.

На відміну від традиційного статичного підходу, сучасний SWOT-аналіз:

орієнтується на інтеграцію з цифровими платформами (наприклад, поєднання з ERP, BSC або BI-системами для автоматичного збору даних);

використовується як інтерактивний інструмент стратегічних сесій з участю міжфункціональних команд (виробництво, фінанси, IT, HR);

часто застосовується в комбінації з іншими методами (PESTLE, BCG-матриця, GAP-аналіз) для розширеного бачення ситуації.

SWOT дозволяє:

об'єктивно оцінити внутрішні ресурси та компетенції підприємства (сильні та слабкі сторони);

виявити зовнішні можливості та загрози, які виникають у результаті змін ринку, регуляторних вимог (зокрема екологічних стандартів), технологічних інновацій або геополітичних факторів.

У металургійній галузі SWOT-аналіз набув особливої актуальності в умовах:

переходу до низьковуглецевого виробництва;

цифровізації (Індустрія 4.0, автоматизація);

потреби швидко адаптуватися до змін у світових ланцюгах постачання та споживчому попиті.

Такий аналіз допомагає сформувавши реалістичну, але амбітну стратегію, узгоджену з реальними можливостями підприємства та зовнішніми умовами, а також чітко розставити пріоритети у програмах розвитку, інвестиціях, інноваціях і підготовці персоналу.

1.10. Обґрунтування вибору слябової машини безперервного лиття

Проведений аналіз сучасного обладнання та викликів сьогодення показав, що найбільш ефективним шляхом модернізації для комбінату «КАМЕТ-СТАЛЬ» є заміна наявної сортової машини безперервного лиття заготовок №3 на нову слябову МБЛЗ (машину безперервного лиття слябів) із продуктивністю понад 2,2 млн тонн на рік. Такий вибір обумовлений низкою техніко-економічних переваг. По-перше, безперервне розливання сталі на слябовій МБЛЗ дозволяє значно знизити втрати металу порівняно з традиційним розливом або навіть застарілими технологіями: обрізки кінців зливок при старих методах могли сягати 15–25%, тоді як сучасне безперервне лиття майже усуває ці втрати. Це означає вищий вихід придатного металу – на практиці перехід від розливання в зливки до МБЛЗ дає до 10% покращення виходу сталі придатної для прокатки [3]. По-друге, слябова машина забезпечує кращу однорідність та якість заготовки по довжині і перерізу, що критично для подальшого виробництва листового прокату. Сучасні технології МБЛЗ (гідрравлічні коливальні системи, електромагнітне перемішування, динамічне м'яке обтиснення тощо) мінімізують внутрішні

дефекти та сегрегацію, тому якість слябів значно вища порівняно з блюмами/біллетами, відлитими на старих установках.

Не менш важливим фактором є ринкові потреби та стратегія продуктового портфеля. Сляби – це проміжний продукт для виробництва листового прокату, пластин і рулонної сталі, яка має високу додану вартість. Нині, після втрати виробничих потужностей у Маріуполі, в Україні відчутний дефіцит власних слябів для прокатних станів: у 2021 році два маріупольські комбінати (Азовсталь і ММК ім. Ілліча) відливали сукупно понад 8,2 млн т слябів на рік, з яких більша частина йшла на прокатку плоского прокату на власних станах та переробних заводах Metinvest за кордоном [31]. Втрата цих активів через воєнні дії означає, що будівництво слябової МБЛЗ на Каметсталі актуальне як ніколи – отримані сляби можуть частково замінити вибулий обсяг, забезпечивши сировиною прокатні потужності групи (в т.ч. в ЄС) та зміцнивши експортний потенціал підприємства. В умовах зростаючого протекціонізму на ринках готового металу продаж напівфабрикатів-слябів лишається відносно безбар'єрним [40], що відкриває для Каметсталі нові можливості збуту. З економічної точки зору, перехід від випуску тільки сортових заготовок (біллетів, блюмів) до виробництва слябів дозволить диверсифікувати продуктову лінійку і підвищити маржинальність: собівартість виробництва товстих слябів на тонну нижча за рахунок масштабу і вищого виходу, тоді як реалізаційна ціна плоского прокату, виробленого зі слябів, істотно вища за арматуру чи катанку зі сталевих біллетів. Таким чином, з усіх аналізованих варіантів модернізації обрано слябову МБЛЗ – за сукупністю технічних, якісних та економічних аргументів це найкраще рішення для розвитку комбінату в сучасних

умовах. Бенчмаркінг слябової та сортової МБЛЗ зображено у таблиці 1.14

Таблиця 1.14 - Бенчмаркінг: порівняння слябової та сортової МБЛЗ

Критерій порівняння	Сортова МБЛЗ	Слябова МБЛЗ
Тип МБЛЗ	Квадратна/кругла (біллетна)	Слябова (плоска заготовка)
Кількість струменів	4–12	1–2
Річна продуктивність (на агрегат)	~1,2–2,4 млн т/рік	~2–2,5 млн т/рік
Середня продуктивність на 1 струмінь	~0,1–0,25 млн т/рік	~2 млн т/рік
Розміри заготовки	100×100 – 150×150 мм (іноді до 180 мм)	150–250 мм товщина, до 2000 мм ширина
Основна продукція	Арматура, катанка, прокатні профілі	Листовий прокат, рулон, товстолист
Рівень автоматизації	Базова автоматизація, переважно 2-го покоління	Сучасна автоматизація: 3D Soft Reduction, AI-контроль
Якість заготовки	Середня, залежить від налаштувань охолодження	Висока – мінімізація раковин і дефектів
Енергоефективність	Нижча, через більшу частку нагріву зливків	Вища – менше повторного нагрівання
Потреба в обслуговуванні	Висока – більше одиниць обладнання	Нижча – менше агрегатів на той самий обсяг
Питомі витрати на 1 т сталі	Вищі (через розпорошення потужностей)	Нижчі (за рахунок ефекту масштабу)
Екологічність виробництва	Менш екологічна – більше нагріву, CO ₂ та палива	Вища – менше викидів, вища енергоефективність

1.11.Сучасні підходи до менеджменту в умовах модернізації

Успішна реалізація технічної модернізації неможлива без відповідних змін у системі менеджменту підприємства. Впровадження нової слябової МБЛЗ на Каметсталі буде тісно пов'язане із трансформацією моделі управління – перехід до цифровізованих, гнучких та ефективних методів менеджменту. Ми вивчили сучасні підходи до управління виробничими підприємствами та обрали комплексну модель, що найкраще відповідає потребам комбінату в постмодернізаційний період. Зокрема, планується інтегрувати систему автоматизації нового обладнання в загальнозаводську інформаційну мережу (рівні АСУТП та ERP). Нова МБЛЗ буде оснащена тисячами датчиків і цифрових контурів керування, що генеруватимуть великий обсяг даних у реальному часі. Це вимагає створення датоцентричної культури управління: рішення прийматимуться на основі актуальних показників продуктивності, якості, простоїв тощо, які керівництво отримуватиме негайно завдяки інструментам бізнес-аналітики. Такий data-driven менеджмент підвищить оперативність і обґрунтованість дій управлінців, мінімізуючи роль суб'єктивних чинників.

Крім того, перехід на нове обладнання стане поштовхом до оптимізації організаційної структури і впровадження сучасних управлінських методологій. Планується запровадити принципи бережливого виробництва (Lean) та Agile-менеджменту для підвищення гнучкості та продуктивності. Зокрема, на рівні цеху МБЛЗ і суміжних підрозділів будуть сформовані автономні крос-функціональні команди, наділені повноваженнями швидко вирішувати поточні завдання і впроваджувати покращення процесів. Це відповідає найкращим світовим практикам:

високорезультативні цифрові організації поєднують Agile-підходи з Lean-менеджментом, що взаємно доповнюють один одного [41]. Agile-методи (ітеративне впровадження змін короткими спринтами, регулярні рев'ю і коригування планів) будуть застосовані, наприклад, при освоєнні нової МБЛЗ – мультидисциплінарна команда інженерів-металургів, IT-спеціалістів та операторів щотижнево оцінюватиме прогрес пусконаладження і оперативно вирішуватиме проблеми. Паралельно принципи Lean допоможуть виявити й усунути «вузькі місця» у виробничому ланцюжку: аналіз потоків створення цінності від виплавки сталі до відвантаження готового прокату дозволить зменшити втрати часу і ресурсів, стандартизувати нові процеси і закріпити найкращі практики роботи.

Окрему увагу приділено розвитку культури постійного вдосконалення (Kaizen) та залученню персоналу. Разом із модернізацією обладнання буде здійснено оптимізацію чисельності та перепідготовку кадрів – працівники перейдуть на нові цифрові ролі (оператори автоматизованих систем, аналітики даних тощо), і водночас отримають більше можливостей впливати на покращення процесів. Керівництво запровадить механізми збору пропозицій від працівників, регулярні командні наради для аналізу проблем і генерації ідей покращення технології розливки, систем мотивації за впровадження корисних ініціатив. Такі інструменти Change Management і розвиток лідерства змін (Digital Leadership) допоможуть згладити перехідний період і сформувати у колективі проактивне ставлення до інновацій. В підсумку комбінат отримає оновлену модель менеджменту, адаптовану під цифрову епоху та новий виробничий уклад: дані в реальному часі + гнучкі команди + безперервні поліпшення = максимально ефективна експлуатація нового

обладнання і сталий розвиток підприємства. Всі ці зміни тісно пов'язані з будівництвом МБЛЗ – фактично, введення нового агрегату виступає каталізатором трансформації управління, і навпаки, сучасний менеджмент є запорукою успішної реалізації настільки складного інвестиційного проекту.

Висновки

На основі проведеного аналізу можна зробити однозначний висновок: будівництво слябової МБЛЗ на Каметсталі є наразі найбільш необхідним і виправданим кроком з усіх можливих напрямів модернізації. Це рішення дозволяє одночасно вирішити кілька стратегічних завдань: різко підвищити продуктивність і якість сталевих заготовок, розширити продуктивний асортимент за рахунок плоских напівфабрикатів, посилити позиції комбінату на внутрішньому та зовнішніх ринках (в тому числі компенсувати втрату маріупольських виробництв слябів) [42], а також поліпшити економічні показники за рахунок зниження собівартості і підвищення маржинальності продукції. Бенчмаркінг із наявними в Україні машинами безперервного лиття підтвердив перевагу обраного шляху – за допомогою одного нового агрегату КАМЕТ-СТАЛЬ зможе вийти на рівень світових лідерів галузі за технологією та ефективністю виробництва. Важливо підкреслити, що технічна модернізація тягне за собою і необхідність управлінських змін: підприємство вже розпочало підготовку до переходу на сучасну модель менеджменту, зорієнтовану на цифрові технології, Lean/Agile-підходи та розвиток персоналу. Така всебічна трансформація забезпечить максимально повну реалізацію потенціалу нової слябової МБЛЗ, роблячи комбінат «КАМЕТ-СТАЛЬ» більш конкурентоспроможним, гнучким і стійким до викликів ринку у довгостроковій перспективі. У підсумку, впровадження

слябового безперервного розливу – це інвестиція не лише в обладнання, а й у майбутнє підприємства, яка окупиться підвищенням ефективності, якості та прибутковості виробництва.

2. МОДЕЛІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГЗК та КАМЕТСТАЛІ

2.1 Модель №1 будівництва DRP-заводу на ГЗК для виробництва НВІ

У межах цієї моделі на гірничо-збагачувальному комбінаті (ГЗК) будується завод прямого відновлення заліза (DRP) для виробництва гарячебрикетованого заліза (НВІ). Вироблене НВІ транспортується до власних електродугових печей (ЕАФ) для виробництва сталі, а також експортується до країн Європи як високоякісна сировина з низьким вуглецевим слідом. Такий підхід дозволяє скоротити викиди CO₂ до 60–70% порівняно з доменною схемою, забезпечити стабільну валютну виручку й створити інтегрований низьковуглецевий виробничий ланцюг від руди до сталі. На рисунку 2.1 зображено проєкт створення комплексу з виробництва НВІ на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті (потужність – 2,5 млн т/рік).

Рисунок 2.1 Проєкт комплексу з виробництва НВІ на Центральному ГЗК (потужність – 2,5 млн т/рік)

1. Зона розташування реакторів DRP – розміщення реакторів, ліній подачі газу, систем контролю температури, охолодження та очищення газів.

2. Склад НВІ – проміжний пункт зберігання гарячого металізованого заліза перед брикетуванням.

3. Вузол відвантаження НВІ / НВІ – інфраструктура для навантаження готової продукції на залізничний або автомобільний транспорт.

4. ПРУ (пункт регенерації/підігріву газу) – забезпечує циркуляцію та підігрів процесного газу.

5. ГПП (головна понизувальна підстанція) – постачає електроенергію до технологічних об'єктів.

6. АБК (адміністративно-побутовий комплекс) – адміністративні приміщення, побутові кімнати для персоналу, лабораторії та диспетчерські.

7. Нова ЛЕП – зовнішнє підключення електропостачання для покриття зростаючих навантажень.

8. Бункерна естакада – приймання окатишів, включно з транспортуванням із Північного ГЗК (ПГЗК).

9. Галерея подачі окатишів із ЦГЗК – внутрішня система подачі сировини з дільниць №2 та №3 Центрального ГЗК до установки DRP.

1. Загальна характеристика проекту

Проект передбачає будівництво та запуск комплексу прямого відновлення заліза (DRP) із подальшим брикетуванням у НВІ на базі Центрального ГЗК. Основна мета – створення сучасного виробництва металізованого продукту з високим вмістом заліза, зручного для транспортування, експорту та використання в електросталеплавильному виробництві (EAF).

Запланована потужність комплексу: 2,5 млн тонн НВІ на рік

Технологія: Midrex або Energiron (HYL / ZR) — провідні світові технології прямого відновлення заліза. На рисунку 2.2 зображено технологію Midrex. На рисунку 2.3 зображено технологію Energiron (HYL / ZR).

Рисунок 2.2 – Установа Midrex (HYL / ZR).

Рисунок 2.3 – Установа Energiron (HYL / ZR).

2. Сировинне забезпечення комплексу

Проект передбачає подвійне джерело постачання окатишів:

Центральний ГЗК: Постачання – 2,3 млн т/рік власних окатишів через існуючу систему бункерів та транспортерів.

Північний ГЗК (ПГЗК): Додаткове постачання – 1,3 млн т/рік, що потребує створення нової/модернізованої бункерної естакади для приймання окатишів.

Сумарне забезпечення окатишами: 3,6 млн т/рік, що повністю покриває потреби DRP-лінії.

3. Технологічний процес

1. Пряме відновлення заліза (DRI):

Встановлення вертикального реактора, де окатиші взаємодіють з нагрітим відновлювальним газом (CO, H₂), утворюючи металізований продукт без плавлення.

2. Брикетування (HBI):

Після відновлення матеріал гарячим пресується у щільні брикети (HBI) – це зменшує ризик окиснення та спрощує логістику.

3. Відвантаження:

Брикети подаються на станцію відвантаження, звідки транспортуються на експорт або до сталеплавильних підприємств.

4. Логістика та інфраструктура

Інтеграція з існуючими транспортними системами ЦГЗК

Галереї, склади, бункери – використовуються без суттєвих змін.

Розвиток інфраструктури:

Додаткове залізничне сполучення або автомобільні під'їзні шляхи.

Нова лінія електропередач (ЛЕП) – забезпечення енергетичних потреб DRP.

5. Екологічні та стратегічні переваги

Зниження викидів CO₂: НВІ є важливою складовою декарбонізації металургії. У порівнянні з чавуном з домни – мінус 40–60% CO₂ на тонну сталі.

Висока якість НВІ:

92% Fe, стабільний хімічний склад, мінімальна кількість домішок.

Експортна привабливість: НВІ легко транспортується морем та залізницею, не окислюється, не самозаймається. Високий попит у Європі, США, Туреччині.

Підготовка до CBAM: Продукт із зниженою вуглецевою складовою має переваги при поставках до ЄС в умовах дії механізму прикордонного вуглецевого регулювання (CBAM) . Орієнтовні капітальні витрати НВІ-проекту (CAPEX) потужністю 2,5 млн т/рік наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Орієнтовні капітальні витрати НВІ-проекту потужністю 2,5 млн т/рік (CAPEX).

Показник	Midrex (оцінка)	Energiron (оцінка)
Потужність, млн т НВІ/рік	2,5	2,5
Базові аналоги		

Продовження табл. 2.1

Показник	Midrex (оцінка)	Energiron (оцінка)
Орієнтовний CAPEX, \$ млн	~	~
Відмінності	Стандартний Midrex-модуль з риформером; широка застосованість	Пресуризована установка, інтегрована очистка CO ₂ ; менша площа та обладнання

У таблиці наведено ключові параметри для двох провідних технологій прямого відновлення заліза – Midrex та Energiron – включаючи оцінку потужності, базові аналоги реалізованих проєктів, орієнтовні капітальні витрати та основні технічні відмінності між технологіями. Порівняння слугує основою для вибору найбільш придатної технології при плануванні будівництва НВІ-комплексу на ГЗК. Оціночна структура річних операційних витрат НВІ-комплексу (OPEX) при потужності 2,5 млн т НВІ наведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Оціночна структура річних операційних витрат НВІ-комплексу потужністю 2,5 млн т.

Стаття витрат	Кількість/норма	Витрати, \$ млн/рік (Midrex)	Витрати, \$ млн/рік (Energiron)
Окатиші (Fe сировина)	~		

Продовження табл. 2.2

Стаття витрат	Кількість/норма	Витрати, \$ млн/рік (Midrex)	Витрати, \$ млн/рік (Energiron)
Природний газ			
Електроенергія			
Персонал			
Ремонт та матеріали			
Логістика внутрішня			
Логістика експорт			
Разом OPEX (сума всіх статей)			

У таблиці представлена деталізована структура річних операційних витрат для комплексу з виробництва гарячебрикетованого заліза (НВІ) за двома альтернативними технологіями — Midrex і Energiron. Для кожної статті витрат наведено кількісні показники, нормативи споживання, а також орієнтовні витрати в доларах США. Основними складовими OPEX є вартість окатишів, природного газу, електроенергії, витрати на персонал, ремонт, а також логістичні витрати. Технологія

Energiron демонструє дещо нижчі витрати на газ завдяки більш ефективному споживанню енергії, що забезпечує потенційну економію близько \$10/т продукції. Загальний рівень операційних витрат оцінюється на рівні \$530–600 млн/рік для Midrex та \$520–590 млн/рік для Energiron, що відповідає собівартості НВІ близько \$210–240/т і \$205–235/т відповідно. Ключові фінансові показники ефективності НВІ-проєкту наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Ключові фінансові показники ефективності НВІ-проєкту.

Показник	Значення (приблизно)
Річний виторг (повний)	
– у т.ч. експортна виручка	
Річний операційний прибуток	
Маржинальність	
Період окупності (Payback)	
ROI (прибуток/інвестиції)	
Типовий горизонт оцінки	

У таблиці наведено основні фінансові індикатори для оцінки доцільності інвестицій у виробництво НВІ за технологією прямого відновлення заліза. Показано прогнозований річний виторг, у тому числі частку експортної виручки, рівень операційного прибутку та маржинальність. Також наведено показники періоду окупності інвестицій (Payback), рентабельності (ROI) та типовий горизонт фінансового планування. За розрахунками,

, що забезпечує річний прибуток

ROI на рівні

25–35% свідчить про високу інвестиційну привабливість. Екологічний ефект та фактор СВAM для НВІ-проєкту наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Екологічний ефект та фактор СВAM для НВІ.

Показник / фактор	Значення / опис
Скорочення викидів CO ₂ (на 1 т продукції)	
Загальне зниження CO ₂ для проєкту	
СВAM – додаткові витрати на CO ₂ для імпорту в ЄС	
Вартість CO ₂ -квот (оцінка при €80/т CO ₂)	
Експортна вигода (35% НВІ у ЄС)	
Відсутність аглофабрики і коксових батарей	
Якість сировини (НВІ)	
Опція уловлювання CO ₂ (Energiron)	
Довгострокова стійкість проєкту	

У таблиці наведено ключові екологічні переваги реалізації НВІ-проєкту потужністю

У сукупності ці чинники підвищують стійкість проєкту до екологічних регуляцій ЄС.

2.2 Модель №2 металургійне виробництво без використання доменного процесу на Каметсталі

Наступна модель передбачає створення повноцінного металургійного виробництва без використання доменного процесу. Основу становить поєднання технологій прямого відновлення заліза (DRI), елект-родугового сталеплавильного процесу (ДСП) та литейно-прокатного комплексу (ЛПК). На рисунку 2.4 зображено модель бездоменного виробництва сталі із застосуванням сучасних екологічних та енергозбе-рігаючих технологій на Каметсталі.

Рисунок 2.4 - Модель бездоменного виробництва сталі на Камет-сталі.

Склад відновленого продукту (СВП) – призначений для зберігання DRI або HBI, що надходить із установки прямого відновлення, та забезпечує безперервну подачу металошихти до печей.

Електродугові печі (ДСП-1 і ДСП-2) – основні плавильні агрегати, у яких DRI та металобрухт переплавляються у рідку сталь.

Машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ №1 і №2) – твердять рідку сталь у вигляді слябів.

Прокатна частина ЛПК – виконує гарячу прокатку слябів у готову продукцію: товстолистовий прокат або рулон.

Газоочисна установка (ГОУ) – забезпечує ефективне очищення технологічних викидів і дотримання екологічних нормативів.

Головна понизувальна підстанція (ГПП) – відповідає за надійне енергоживлення всіх основних агрегатів підприємства.

Майданчик первинного охолодження шлаку (МПОш) – місце для охолодження та первинної обробки шлаку, який утворюється після плавки.

Водо-водяний центр (ВВЦ) – система циркуляції води для охолодження обладнання й агрегатів технологічного циклу. На рисунку 2.5 зображено можливе місце розміщення DRP.

Рисунок 2.5 – Розміщення DRP комплексу на Каметсталі

1. Комплекс DRP 1 – перша зона для розміщення обладнання прямого відновлення заліза.

2. Комплекс DRP 2 – альтернативна або додаткова зона для розміщення DRP, що дозволяє масштабування виробництва.

3. СВП (склад відновленого продукту) – зони зберігання DRI/HBI, розташовані поруч з обома DRP-комплексами, забезпечують безперебійну подачу сировини до печей.

4. Склад окатишів – пункт приймання і зберігання залізорудних окатишів, що слугує сировинною базою для DRP.

5. ГПП (головна понизувальна підстанція) – інфраструктурний об'єкт для постачання електроенергії до комплексу, розміщений на східній частині майданчика. На рисунку 2.6 зображено автотранспортний маршрут.

Рисунок 2.6 – Маршрут переміщення HDRI автотранспортом

1. Маршрут №1 подачі HDRI – короткий шлях довжиною 4,9 км, позначений фіолетовою пунктирною лінією.

2. Маршрут №2 подачі HDRI – альтернативний шлях довжиною 6,8 км, також позначений фіолетовим пунктиром, проходить південніше.

3. Комплекс DRP – вихідна точка транспортування HDRI, розташована у правій частині карти (зелена зона).

4. КПП №5 та КПП №12 – контрольні пункти пропуску на шляху переміщення HDRI, через які проходить транспорт.

5. Вулиці Широка та Конверторна – основні магістралі, якими рухається транспорт усередині проммайданчика.

6. Існуючі залізничні колії (станція Шлакова) – показані для орієнтації та оцінки потенційних перетинів із маршрутом автотранспорту.

7. Ділянки перетину з/д переїздів – виділені прямокутниками, враховуються під час проєктування логістики.

8. Прибережна захисна смуга (50 м) – показана блакитною лінією вздовж річки, її враховано при розрахунках екологічного впливу.

Технологічний процес

Зберігання та подача шихти зі складу відновленого продукту (СВП) у електродугові печі (ДСП)

Після виходу з установки прямого відновлення заліза (DRP) відновлений продукт — DRI або гарячебрикетоване залізо (HBI) — надходить у склад відновленого продукту (СВП). Тут він зберігається з урахуванням вимог температурного і атмосферного захисту, щоб запобігти окисленню чи втраті металургійних властивостей.

Із СВП DRI/HBI за допомогою систем подачі (стрічкові конвеєри, бункери або автотранспорт) дозовано транспортується в електродугові печі (ДСП). Разом із DRI/HBI до шихти додається металобрухт (скрап), який відіграє роль додаткового металевого джерела та стабілізатора температури плавлення. У печах відбувається переплавлення шихти за допомогою електричної дуги, утворюється рідка сталь із заданим хімічним складом.

Розливка сталі на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ)

Після завершення плавки рідка сталь транспортується в сталерозливні ковші й подається на машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Тут відбувається контрольоване охолодження сталі у мідних кристалізаторах з інтенсивним водяним охолодженням, в результаті чого формується напівфабрикат — сляб.

Сляби мають прямокутний поперечний переріз товщиною 150–250 мм і шириною до 1850 мм. Важливою перевагою МБЛЗ є можливість оперативно змінювати розміри слябів, адаптуючи виробництво під потреби прокатного стану або клієнтів.

Гаряча прокатка слябів у литейно-прокатному комплексі (ЛПК)

Після виходу з МБЛЗ сляби направляються на прокатний стан, де проходять процес гарячої прокатки. Якщо застосовується технологія hot charging (гаряча розкатка без охолодження), це дозволяє суттєво знизити витрати енергії на повторний нагрів сляба.

У прокатному стані сляб поступово деформується за допомогою валків і перетворюється на товстолистовий прокат або гарячекатаний рулон, залежно від конфігурації обладнання та потреб споживача.

Паралельно працюють допоміжні системи:

ГОУ – для газоочистки;

МПОш – для охолодження та утилізації шлаку;

ГПП – для енергопостачання;

ВВЦ – для оборотного водопостачання.

У таблиці 2.5 наведено переваги реалізації варіанту DRI + ДСП + ЛПК.

Таблиця 2.5 – Переваги реалізації варіанту DRI + ДСП + ЛПК.

Категорія	Опис переваг
Екологія	Повна відмова від коксохімічного та доменного виробництва дозволяє суттєво знизити викиди CO ₂ , NO _x , SO ₂ та пилу.
Енергоефективність	Нижчі температури та відсутність використання коксу зменшують витрати енергії.
Гнучкість виробництва	Можливість варіювати сортамент продукції (лист, рулон), оперативно реагувати на зміни попиту.
Інвестиційна привабливість	Поетапна реалізація дозволяє розподілити інвестиційне навантаження та скоротити термін повернення вкладень.
Імпортозаміщення	Виробництво сталі з вітчизняної руди без потреби в імпорті чавуну чи коксу.
Сумісність із «зеленою металургією»	Високий рівень відповідності критеріям CBAM і перспективи експорту до ЄС.

У таблиці представлено ключові переваги реалізації бездоменної моделі виробництва сталі, яка базується на технологіях прямого відновлення заліза (DRI), електродугового плавлення (ДСП) і гарячої прокатки (ЛПК). CAPEX комплексу НВІ + ДСП + МБЛЗ + ЛПК (відмова від доменного виробництва) наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – CAPEX комплексу НВІ + ДСП + МБЛЗ.

Стаття інвестицій	Опис	Оцінка млн \$	CAPEX,
Установка прямого відновлення (DRI)			
Лінія брикетування НВІ			
Електродугові печі (ЕАФ/ДСП)			
Машина безперервного лиття (МБЛЗ)			
Інфраструктура та інше			
Разом (орієнтовно)			

У таблиці представлено структуру основних капітальних витрат для реалізації повного виробничого комплексу на базі бездоменної технології: від установки прямого відновлення заліза до розливки сталі. Оцінка виконана з урахуванням даних літератури та аналогів. Сумарні капвкладення на комплекс DRI–EAF складають близько €580–750 на

тонну річної потужності. OPEX комплексу НВІ + ДСП + МБЛЗ + ЛПК наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7– OPEX комплексу НВІ + ДСП + МБЛЗ + ЛПК.

Стаття витрат	Одиниця / норма	Ціна (середина 2025)	Витрати, \$/т сталі
Окатиші залізорудні			
Природний газ			
Електроенергія			
Електроди, вогнетриви			
Інше (кисень, флюси)			
Праця + ремонт			
Разом змінні витрати			
+ Можлива частка брухту			
Повна собівартість (без амортиз., без брухту)			

З таблиці видно, що основну частку собівартості складають окатиші та газ (разом 60%). За наведеними даними, сумарні витрати виробництва сталі методом НВІ+EAF становлять ~\$ /т (порядку величини). Економічну ефективність і рентабельність наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Економічна ефективність і рентабельність.

Показник / аспект	Значення / опис
Операційний прибуток (ЕВІТДА)	
Термін окупності (простий)	
Термін окупності (з урахуванням дисконту 8%)	
IRR (внутрішня норма прибутковості)	
Вплив CO ₂ і СВМ	
Період покращеної рентабельності	
Додаткові вигоди	

Таблиця відображає ключові показники економічної ефективності проєкту будівництва комплексу НВІ + ДСП + МБЛЗ. Очікуваний операційний прибуток (ЕВІТДА) становить близько

, що може

дати

. Економічну

модель НВІ+ЕАФ: викиди CO₂, СВАМ та експортну стратегію наведено в таблиці 2.9.

Таблиця. 2.9 – Економічна модель НВІ+ЕАФ: викиди CO₂, СВАМ

Показник / стратегія.	Значення / опис
Економія на СВАМ завдяки НВІ+ЕАФ	
Конкурентна перевага при СВАМ	
Порівняння собівартості з CO ₂	
Зниження енергоємності	
Екологічні переваги	
Обсяг експорту сталі	
Ціни на напівфабрикати	
Виручка від експорту сталі	
Додаткова виручка від НВІ	
Основні ринки збуту	
Перспективи експорту	

Модель HBI+EAF забезпечує значну економію на викидах CO₂ (до € млн/рік) та стабільну валютну виручку з експорту (понад \$1 млрд/рік), що робить її вигідною і стійкою до екологічних регуляцій ЄС.

2.3 Обґрунтування вибору слябінгової МБЛЗ як першого етапу модернізації виробництва сталі на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

В умовах воєнного стану, високих інвестиційних ризиків і жорсткої конкуренції на світовому ринку сталі, оптимальним першим етапом поетапної трансформації виробництва у напрямку моделі DRI + ДСП + ЛПК є будівництво сучасної слябінгової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Цей сценарій передбачає часткову модернізацію існуючого металургійного комплексу шляхом встановлення нової МБЛЗ, орієнтованої на випуск ширших слябів, придатних як для експорту, так і для власної прокатки.

При цьому зберігається доменне виробництво чавуну та конвертерний цех (BOF), але замість (або паралельно з) випуском сортової заготовки впроваджується безперервне лиття слябів — напівфабрикату для виробництва листового прокату з вищою доданою вартістю. Потужність нової МБЛЗ проектується на рівні 2,5 млн тонн сталі на рік, що забезпечує повне завантаження наявного сталеплавильного обладнання, зокрема двох конвертерів.

Це рішення є менш інноваційним порівняно з повним переходом на DRI+EAF, однак значно швидше та дешевше в реалізації. Таким чином, його доцільно розглядати як логічний і економічно виправданий перший крок до комплексної модернізації підприємства.

Цільові технічні характеристики майбутньої МБЛЗ зображені у таблиці 2.10

Таблиця 2.10 цільові технічні характеристики майбутньої МБЛЗ

Кількість струмків	2
Товщина сляба	150 мм, 170 мм, 250 мм
Ширина сляба	900 мм, 1250 мм, 1550 мм, 1850 мм
Довжина сляба	від 5,1 до 12,0 м
Орієнтовна продуктивність	близько 3 млн тонн сталі на рік

Гнучкий формат розливки: оперативна зміна розмірів сляба під потреби замовника та прокатного стану (власного або зовнішнього)

Очікувані переваги реалізації слябінгової МБЛЗ:

Виробництво високоякісного напівфабрикату

Сучасна конструкція МБЛЗ дозволить отримувати конкурентоспроможні сляби з високими показниками чистоти металу, геометричної стабільності та мінімальної кількості дефектів.

Інтеграція автоматизованих систем проектування є важливою умовою ефективної реконструкції металургійного обладнання. Як зазначено у спільній роботі [44], цифрові інструменти дають змогу оптимізувати склад агрегатів і скоротити терміни впровадження технічних рішень. Це особливо актуально під час модернізації машин безперервного лиття заготовок, де моделювання вузлів допомагає заздалегідь оцінити продуктивність і сумісність з наявною інфраструктурою.

Придатність продукції для високоякісного гарячекатаного рулону та товстолистого прокату.

Гнучкість і універсальність у виробництві

Можливість швидко адаптувати розміри слябів під потреби конкретних замовників або під вимоги власної прокатної частини.

Забезпечення широкого сортаменту — від вузьких слябів для трубно-будівельної галузі до широких плит для кораблебудування, автомобільної або побутової індустрії.

Підвищена рентабельність

Завдяки високій маржинальності плоского прокату та зростаючому попиту в ЄС, інвестиції у слябінгову МБЛЗ швидко окупляться, навіть без негайного запуску DRI + ДСП.

Пряме постачання слябів на експорт або партнерські прокатні потужності — додаткове джерело прибутку.

Локалізація виробництва і зниження імпортозалежності

Власне лиття слябів дозволить відмовитися від закупівлі напівфабрикатів за кордоном (у т.ч. з ризикових напрямків), посилюючи незалежність підприємства.

Поетапність і фінансова керованість

У порівнянні з повним циклом (DRI + ДСП + ЛПК), побудова однієї слябінгової МБЛЗ є менш капіталомісткою, технічно простішою та можливою до реалізації в короткі строки.

Це дозволяє почати трансформацію підприємства без потреби в залученні надмірних коштів або міжнародних позик, які в нинішніх умовах можуть бути ризикованими чи недоступними. У таблиці 2.11 наведено CAPEX для проєкту впровадження слябової МБЛЗ.

Таблиця 2.11 – CAPEX для проекту впровадження слябової МБЛЗ.

Таблиця 2.12 – ОРЕХ (операційні витрати).

Таблиця 2.13 – Економічна ефективність і рентабельність.

Встановлення слябінгової МБЛЗ є економічно доцільним рішенням з помірним CAPEX, що забезпечує швидке підвищення маржі та стратегічне зміцнення позицій комбінату. Проєкт окупається за 9–12 років і відкриває шлях до подальшої модернізації. У таблиці 2.14 наведено експортну модель (обсяги, виручка, ринки).

Таблиця 2.14 – Експортна модель.

Експортна модель із слябами дозволяє отримати до валютної виручки щороку, покращити структуру експорту та підвищити привабливість підприємства на зовнішніх ринках. Це особливо важливо на тлі втрати потужностей у Маріуполі та дефіциту слябів у Європі

після 2024 року. У таблиці 2.15 наведено екологічний ефект впровадження МБЛЗ.

Таблиця 2.15 – Екологічний ефект впровадження МБЛЗ.

Екологічний ефект моделі 2 обмежується частковим зниженням енерговитрат і мінімальним скороченням CO₂. Вона є перехідним рішенням – підвищує ефективність зараз, але не вирішує стратегічної мети декарбонізації. Втім, підприємство отримує “заділ” на майбутнє: нова ССМ може використовуватись і після переходу на EAF (тобто ця

інвестиція не втратиться), а сам факт модернізації свідчить інвесторам про рух до екологічніших технологій.

2.4 Менеджмент стійкого розвитку в умовах війни та цифрової трансформації

Організаційна структура підприємства

фінанси, персонал, соціальні питання тощо) згідно з моделлю корпоративного управління холдингу.

Критичний аналіз (організаційна структура):

Консервативна ієрархія: Як і більшість металургійних комбінатів, «КАМЕТ-СТАЛЬ» має чітку вертикальну ієрархію управління. Це забезпечує дисципліну і контроль, але водночас може гальмувати гнучкість і швидкість прийняття рішень на нижчих рівнях. Існує ризик, що традиційна бюрократична структура повільно адаптується до швидких змін ринку чи технологій.

Інтеграція двох підприємств: Об'єднання сталеплавильного та коксохімічного виробництв в межах одного ПрАТ створило складну структуру. Хоча це дозволило централізувати управління, на практиці інтеграція могла супроводжуватися труднощами узгодження процесів та культур двох різних колективів. Певний час вимагала оптимізація дубльованих функцій та налагодження єдиної системи планування.

Залежність від холдингу: Вхідження до «МЕТІНВЕСТу» означає, що ключові рішення (інвестиції, модернізація, соціальні проекти) ухвалюються з урахуванням стратегії групи. З одного боку, це приносить ресурси та стандарти (єдині фінансові, екологічні, кадрові політики), з іншого – обмежує автономність місцевого керівництва. Якщо пріоритети холдингу зміняться, підприємство мусить підлаштовуватися, навіть якщо локальні потреби інші.

Кадровий голод у керівництві: Через війна багато працівників мобілізовані або виїхали, і це може стосуватися також управлінців середньої ланки. Організаційна структура стикається з викликом підтримання компетентності: необхідно швидко готувати кадровий резерв на

керівні посади, щоб уникнути дефіциту управлінських кадрів у разі втрати досвідчених спеціалістів.

Стиль управління та керівництво

Водночас належність до SCM/«МЕТІНВЕСТ» визначає впровадження сучасних управлінських підходів. На рівні стилю управління це проявляється у комбінованій моделі: стратегічні завдання та ключові показники встановлюються керівництвом холдингу, а місцева команда реалізує їх із врахуванням специфіки виробництва. Компанія дотримується принципів ділової етики та комплаєнсу (на підприємстві діють ко-рпоративні політики, кодекс етики) – ці аспекти контролюються дирекцією з комплаєнсу «МЕТІНВЕСТу». Стиль керівництва можна охарактеризувати як директивно-коучинговий: з одного боку, чітка субординація і накази зверху вниз, з іншого – у складний воєнний час керівники

акцентують підтримку персоналу, мотивацію та навчання (про що свідчать інвестиції у навчальні центри та соцпроекти для співробітників). Так, керівництво підкреслює важливість розвитку молодих спеціалістів і збереження кадрового потенціалу навіть під час війни.

Критичний аналіз (стиль управління та лідерство):

Традиційний підхід: Сильна сторона керівництва – глибоке знання металургії – одночасно може бути слабкістю в контексті сучасних управлінських трендів. Менеджмент «Каметсталі» сформований здебільшого з представників старшого покоління галузі, що може означати тяжіння до авторитарного стилю та меншої відкритості до інноваційних методів управління (гнучкі методології, плоскі структури, автономні команди). Існує ризик недостатньої різноманітності думок у топменеджменті (мало представників нової генерації або інших галузей).

Виклики воєнного часу: Керівництво підприємства вимушене поєднувати роль виробничих менеджерів з кризовими менеджерами. Постійний стрес через загрози обстрілів та перебої енергопостачання міг сформувати більш жорсткий, реактивний стиль управління. Це допомагає в екстрених ситуаціях, але може пригнічувати ініціативу підлеглих. Молодші фахівці можуть відчувати брак залучення до прийняття рішень, що впливає на моральний дух.

Організаційна культура холдингу: Хоча «МЕТІНВЕСТ» впроваджує сучасні стандарти (комплаєнс, прозорість, KPI), старі виробничі традиції не завжди легко суміщаються з новою культурою. Є ймовірність опору змінам на середньому рівні керівництва, коли потрібні інновації або нестандартні рішення. Також концентрація влади у межах хо-

лдингу означає, що керівник комбінату має обмежений простір для самостійних рішень – інколи погодження потребує часу, що уповільнює реакцію на локальні проблеми.

Лідерство і мотивація: З позитивного боку, нинішній генеральний директор Олександр Третяков – виробничник із авторитетом, але невідомо, наскільки він є лідером-змінником. Поки що пріоритетами декларуються стабілізація та відновлення виробництва, проте менше інформації про його бачення інновацій чи “проривів”. Потенційним ризиком є те, що керівництво зосередиться лише на підтримці існуючого рівня, а не на трансформаційному розвитку, який потрібен для довгострокового успіху (цифрова трансформація, «зелена» металургія тощо).

Кадрова політика (підбір, розвиток, мотивація персоналу)

Політика управління персоналом на «Каметсталі» в останні роки зорієнтована на збереження і поповнення трудового колективу в складних умовах війни, підвищення кваліфікації працівників та мотивацію молоді до роботи на підприємстві. У відповідь на дефіцит кадрів в умовах мобілізації та відтоку частини працівників за кордон, компанія впровадила комплекс заходів з підбору і адаптації персоналу. Зокрема, у 2023–2024 рр. комбінат започаткував систему адаптації нових співробітників, яка допомагає новачкам швидше освоїтися і стати ефективними членами колективу. Кожному новому працівникові призначається наставник («адаптер») – досвідчений колега або керівник, який вводить його в роботу, знайомить з правилами та корпоративною культурою підприємства. Такий підхід пришвидшує навчання та підвищує мотивацію новобранців, забезпечуючи зворотний зв'язок і підтримку в перші місяці роботи. За рахунок програми адаптації компанія готує необхідні

кадри безпосередньо «під себе», компенсуючи брак спеціалістів на ринку.

Паралельно «КАМЕТ-СТАЛЬ» активно співпрацює з профільними навчальними закладами регіону, формуючи кадровий резерв із молоді. Підприємство системно проводить профорієнтаційні зустрічі зі студентами місцевих технічних коледжів, пропонує стажування та перше робоче місце талановитим випускникам. Для стимулювання приходу молодих кадрів діє спеціальна програма «Перше робоче місце»: новоприйнятим молодим працівникам виплачується фінансова підтримка у розмірі 50 тис. грн додатково до заробітної плати. Це суттєвий бонус, який робить працю на комбінаті привабливою для вчорашніх студентів. Наприклад, двоє братів-студентів, що прийшли на роботу підручними сталевара під час навчання, відзначають, що «МЕТІНВЕСТ пропонує не лише гідну зарплату, а й соціальний пакет, можливості для навчання та розвитку», що є важливим для молодих співробітників. Тобто кадрова політика робить акцент на матеріальній мотивації (конкурентна зарплатня, премії) та кар'єрному рості (навчання, підвищення кваліфікації).

Для розвитку працівників, попри війну, на підприємстві інвестують у освітню інфраструктуру. Наприкінці 2024 року було відкрито сучасні навчальні класи та тренажерний центр на території комбінату – для підготовки машиністів кранів і проведення інженерно-технічних занять. Цей корпоративний навчальний простір, обладнаний мультимедійною технікою та діючими моделями техніки, є інвестицією в майбутнє підприємства і дозволяє працівникам підвищувати кваліфікацію в комфортних умовах навіть під час воєнного стану. Мотивація персоналу підт-

римується також соціальними програмами: працівники отримують медичне страхування, пільгове оздоровлення, підтримку від корпоративного фонду «МЕТІНВЕСТ» (наприклад, гуманітарну допомогу, підтримку сімей військовослужбовців тощо). Компанія декларує рівні можливості і навіть почала активніше залучати жінок на традиційно «чоловічі» посади, щоб компенсувати брак робітників: за словами директора департаменту організаційного менеджменту Групи, в структурі найму жінок стало більше на 9% – «ми намагаємося посилити присутність жінок у ремонтних професіях – електрикони, електрослюсарі... таким чином вивільняються чоловіки для інших професій». Це свідчить про гнучкість кадрової політики у воєнний час.

Критичний аналіз (кадрова політика):

Дефіцит кадрів та навантаження: Незважаючи на зусилля, кадровий голод залишається суттєвим викликом. За даними Групи, близько 8 тис. працівників «МЕТІНВЕСТу» служать в ЗСУ, а дефіцит персоналу на поточний рівень виробництва – майже 4,7 тис. осіб, найбільш відчутний саме на металургійних комбінатах у Кам'янському та Запоріжжі. Це означає підвищене навантаження на наявний персонал (переробки, суміщення посад), що може призводити до вигорання, травматизму або зниження продуктивності. Молоді фахівці, яких набирають, часто не мають достатнього досвіду, і попри наставництво, вихід на повну ефективність займає час.

Плинність та мобілізація: Воєнний стан спричиняє нестабільність кадрів – чоловіки призовного віку можуть бути мобілізовані у будь-який момент, частина працівників виїхала за кордон або перейшла у більш безпечні галузі. Це підриває сталість кадрового ядра. Особливо важко

замінити висококваліфікованих робітників (сталеварів, прокатників) і інженерів з великим досвідом. Якщо війна затягнеться, комбінат може втратити цілу генерацію майстрів, яких доведеться готувати з нуля.

Мотивація та умови праці: Хоча зарплати на «Каметсталі» вважаються гідними для регіону, інфляція та військові ризики зменшують мотиваційний ефект. Робота в металургії пов'язана з важкими умовами – високі температури, фізичні навантаження, ризики для здоров'я. Молоді люди все частіше обирають легшу або ІТ-сферу. Попри оновлення навчальних класів, самі робочі місця (цехи) залишаються промисловими зонами з неідеальними побутовими умовами. Це може демотивувати новачків – як зазначали студенти-працівники, «перші дні було важко звикнути до високих температур та фізичних навантажень». Компанія вимушена постійно підвищувати соцпакет, щоб конкурувати за робочу силу, що в умовах війни та падіння прибутків є фінансово обтяжливо.

Корпоративна культура та лояльність: Постійний стрес від тривоги, особисті втрати (співробітники, чії родини постраждали від війни) не-гативно впливають на моральний стан колективу. Компанія декларує

підтримку (є ветеранські програми, психологічна допомога), але не всім працівникам це може компенсувати загальний фон. Існує ризик падіння лояльності: якщо працівники відчують, що їхні зусилля недооцінені чи умови недостатньо безпечні, вони можуть шукати іншу роботу або виїхати після війни. Втім, поки що «КАМЕТ-СТАЛЬ» підтримує образ стабільного роботодавця – наприклад, працівники відзначають «стабільність і дружній колектив» як перевагу роботи тут.

Цифровізація, IT-рішення та управлінські технології

Як частина модернізації управління, «КАМЕТ-СТАЛЬ» впроваджує сучасні цифрові рішення та автоматизовані системи для підвищення ефективності виробництва і безпеки. Під егідою дочірньої компанії Metinvest Digital комбінат інтегрований у загальнокорпоративні IT-системи холдингу: використовується єдина ERP-платформа Microsoft Dynamics 365 та аналітичні інструменти Power BI, зокрема для моніторингу виробничих показників та охорони праці. Під час практичних тренінгів студенти профільного університету на «Каметсталі» навчалися працювати саме з цими системами – в реальних умовах відпрацьовували навички користування модулями Dynamics 365 і побудови звітів у Power BI по даних підприємства. Це свідчить, що комбінат уже має впроваджені цифрові інструменти для збору й аналізу даних, що є елементом концепції Industry 4.0. Також впроваджуються спеціалізовані АСУТП (автоматизовані системи управління технологічними процесами) на ключовому обладнанні. Наприклад, у 2023–2024 рр. здійснено повну реконструкцію систем управління машинами безперервного лиття заготовок (МБЛЗ): встановлено нові частотні приводи Siemens замість застарілих перетворювачів, модернізовано систему автоматизації МБЛЗ №2. Це дозволило стабілізувати швидкість розливки сталі і

отримувати точніший різ заготовок, мінімізуючи відходи металу. Крім того, інтегровано системи візуалізації та моніторингу процесу: тепер оператори розливки в режимі реального часу на екранах можуть відстежувати параметри процесу та аналізувати дані для покращення якості продукції. Застосування алгоритмів обробки даних (наприклад, алгоритму стиснення для поліпшення якості поверхні блюмсів) демонструє перехід від ручного управління до цифрового, керованого даними.

Цифровізація торкнулася і допоміжних сфер управління. IT-рішення використовуються для оптимізації ремонтів і технічного обслуговування: в межах проєктів з енергоефективності на комбінаті встановлюють сучасні системи контролю енергоспоживання, ведеться цифровий облік витрат газу, води, електроенергії.

На рівні менеджменту використовується корпоративна інформаційна система для кадрового обліку, фінансів та документообігу, що забезпечує уніфікованість процесів із всіма підприємствами «МЕТІНВЕ-

СТу». Зв'язок керівників і працівників підтримується через онлайн-платформи: діє портал співробітника («Мій кабінет»), де можна переглядати структуру організації, подавати заявки, змінювати особисті дані тощо. В умовах війни багато управлінських нарад перейшли у режим відеоконференцій (Microsoft Teams), що стало звичним елементом цифрової культури. Це дозволило координувати роботу навіть під час перебоїв з транспортом чи евакуації частини персоналу.

Критичний аналіз (цифровізація та ІТ):

Технічна заборгованість: Хоча значні кроки в автоматизації зроблено, «КАМЕТ-СТАЛЬ» все ще успадкував від ДМК застарілу матеріально-технічну базу. Не все обладнання оснащене сучасними датчиками чи контролерами. ІТ-інфраструктура потребує постійних інвестицій – наприклад, покриття Wi-Fi чи промислового інтернету в цехах може бути фрагментарним. Якщо не оновлювати другу і третю чергу систем, може утворитися «цифрова нерівність» на різних ділянках, де одні процеси детально моніторяться, а інші досі залежать від людського фактора.

Сприйняття персоналом: Впровадження нових ІТ-рішень вимагає перекваліфікації персоналу. Частина старших працівників і навіть менеджерів середньої ланки може мати низький рівень цифрової грамотності. Це може гальмувати використання всіх можливостей систем – наприклад, якщо майстри не довіряють даним з Power BI, а покладаються на «ручні» журнали. Необхідна зміна мислення, і хоча молодь швидко адаптується, існує ризик опору або формального використання ІТ (вносять дані для звітності, але не аналізують їх).

Безпека даних: З ростом цифровізації з'являються кіберризики. Металургійні підприємства стають потенційними цілями кібератак, особливо в умовах війни. Якщо система управління технологічним процесом вразлива, зовнішнє втручання може призвести до простоїв чи аварій. Чи достатньо приділяється уваги кібербезпеці – відкрите питання. Збої електромереж також випробовують стійкість ІТ: резервне копіювання, безперебійні живлення для серверів – все це має бути на рівні.

Відставання від Industry 4.0: Хоча «КАМЕТ-СТАЛЬ» впроваджує окремі елементи (датчики, аналітику), до повноцінної цифрової трансформації ще далеко. Наприклад, застосування штучного інтелекту чи машинного навчання для оптимізації процесів (предиктивне обслуговування обладнання, адаптивне керування плавкою) поки прямо не зазначається. Багато рішень – реактивні (усунення вузьких місць) або локальні. На глобальному рівні конкуренти впроваджують безпілотну техніку, роботизацію, цифрових двійників – якщо «КАМЕТ-СТАЛЬ» не підохопить ці тренди після війни, це ризик технологічного відставання.

Фінансові обмеження: ІТ-проєкти потребують значних коштів, яких у воєнний час обмаль. Навіть заявлений бюджет 2,5 млрд грн на модернізацію у 2025 році значною мірою піде на фізичні ремонти, а не на програмне забезпечення. Існує небезпека, що цифровізація сповільниться через перенаправлення ресурсів на критично важливі потреби (енергетика, обладнання). Таким чином, може скластися ситуація, коли базова ІТ-інфраструктура є, але її розвиток застигне до кращих часів – а тим часом світова металургія піде вперед.

Інновації у виробництві та управлінні

Попри військові потрясіння, «КАМЕТ-СТАЛЬ» демонструє прагнення до інновацій як в технологічних процесах, так і в управлінських

практиках. Виробничі інновації спрямовані на розширення продукції, модернізацію обладнання та підвищення ефективності. Так, комбінат активно освоєє випуск нових видів металопродукції, щоб краще відповідати потребам ринку. Протягом 2024 року було розроблено і впроваджено виробництво 13 нових найменувань продукції, з них 12 – у сегменті сортового прокату. Наприклад, на початку 2025 року прокатний цех успішно освоїв випуск арматури стандарту B500SP для польського ринку – раніше таку арматуру в Україні не виробляли. Цей стандарт вимагає особливих параметрів (калібрування, нарізка ребер, маркування), тому знадобилося розробити технічні рішення, скоригувати схеми прокатки, переналаштувати верстати з ЧПУ. У результаті в січні 2025 р. було випущено перші партії арматури діаметром 10–32 мм класу B500SP, а в лютому заплановано доповнити лінійку діаметрами 8, 14, 28 мм. Раніше підприємство також сертифікувало виробництво арматури класу B500B (8–32 мм) для Польщі. Тобто, інновації в продукції полягають у швидкому пристосуванні до євростандартів, що відкриває нові ринки збуту і підвищує експортний потенціал. Крім арматури, комбінат відновив унікальне виробництво суцільнокатаних вагонних осей. Цей прокатний стан – єдиний у світі, де осі виготовляють методом поперечно-гвинтової прокатки. Через війну стан простоював 8 місяців, але у травні 2023 року його знову запущено: виконано замовлення на 3200 осей для українських вагонобудівників. Відновлення цього виробництва стало внеском у програму відновлення залізничного парку країни, а також прикладом гнучкості комбінату – адже після втрати «Азовсталі» довелося шукати альтернативні заготовки для

осей. Тепер осі, потрібні «Укрзалізниці», виробляються силами «Каметсталі», що приносить і комерційну вигоду, і стратегічне значення для економіки.

Технічні інновації на підприємстві здебільшого пов'язані з модернізацією існуючих агрегатів, впровадженням більш сучасних вузлів і енергоощадних рішень. У 2023–2024 рр. підприємство реалізувало кілька масштабних капітальних ремонтів з елементами модернізації: агломераційна машина №9, конвертер №1, коксові печі та допоміжне обладнання. Наприклад, ремонт агломашини №9 став найбільшим оновленням цього вузла за останні роки, охопивши механічну, електричну та інженерну частини. Заміна напрямних апаратів, оновлення мультициклону та пилових бункерів покращить пиловловлення і надійність роботи. Модернізовані вакуум-камери підвищать якість агломерату та продуктивність машини. Крім того, встановлення нового двигуна ексгаустера та частотних приводів в системі газоочистки дозволить знизити аварійні простої й енерговитрати. В конвертерному цеху протягом 2023–2025 рр. поетапно проводяться ремонти конвертерів: вже завершено модернізацію конвертера №1 (роботи стартували наприкінці 2024), заплановано масштабний ремонт конвертера №2 у 2025 році. У коксовому виробництві навесні 2025-го проведено капремонт печі підігріву вбирного масла в цеху уловлювання хімпродуктів – модернізовано ключові вузли, замінено змійовик та пальники, що знизило енерговитрати і стабілізувало процес отримання сирого бензолу. Такі процесні інновації часто невидимі назовні, але вони підвищують екологічність і економічність: зменшуються витрати пари за рахунок використання тепла коксового газу, підвищується ККД обладнання. Окремий напрям – альтернативна енергетика: вперше в історії «МЕТІНВЕСТу»

на «Каметсталі» планується будівництво сонячної електростанції для власних потреб. У 2025 році ведуться передпроектні роботи цього пілотного проєкту, який покликаний зменшити залежність комбінату від зовнішнього енергопостачання і скоротити викиди CO₂. Якщо проєкт буде реалізовано, комбінат зможе генерувати частину електроенергії самостійно, що є інноваційним кроком для української металургії.

Управлінські інновації проявляються у гнучких рішеннях, які приймає менеджмент для оптимізації витрат і підвищення продуктивності. Один із прикладів – ремонтна стратегія підприємства. Замість покладатися тільки на зовнішні підрядні організації, у 2024 році комбінат почав виконувати частину капітальних ремонтів обладнання власними силами. Спеціалісти цеху ремонту устаткування освоїли нові технології відновлення рухомого складу та агрегатів, що дало змогу значно зекономити кошти. Вперше прямо на комбінаті почали капітально ремонтувати гарячевозні вагони-хопери для перевезення агломерату – це здешевило такі ремонти на 25% порівняно із зовнішніми послугами. У 2024 р. відремонтовано 5 вагонів, у 2025 планують ще 6. Також власний ремонтний персонал відновлює самохідні шлаковози: за 2024 р. повернуто в стрій 8 одиниць, у 2025 планують довести до 10. Крім того, методом рихтування було відновлено 230 спікальних візків агломашин, що раніше доводилося відправляти на інші підприємства – тепер ці роботи виконують на місці, заощаджуючи час і кошти. Така практика впровадження «інноваційних ремонтних продуктів» дозволила знизити витрати на відновлення обладнання і підвищити самостійність комбінату. У підсумку керівництво реінвестує зекономлене у розвиток: оголошено, що обсяг капіталовкладень у модернізацію виробництва 2025 року

складе рекордні 2,5 млрд грн. Це будуть 114 інвестиційних проєктів різного масштабу – від капремонту доменної печі №9 до будівництва нового газозбірника, оновлення водогонів і систем управління МБЛЗ. Таким чином, менеджмент комбінату намагається запустити цикл безперервного вдосконалення: скорочення витрат – інвестиції – освоєння нових технологій – знову скорочення витрат, що відповідає сучасним принципам ощадливого виробництва (Lean).

Критичний аналіз (інновації та розвиток):

Переважно інкрементальні зміни: Інновації «Каметсталі» наразі носять еволюційний, а не революційний характер. Комбінат покращує те, що вже є (ремонти, модернізація окремих агрегатів, розширення існуючої лінійки продукції). Радикальних змін – як-от перехід на новий спосіб плавки (електропіч замість доменно-конвертерного) чи впровадження водневих технологій – поки не відбувається, хоча група «МЕТИНВЕСТ» ще до війни розробила стратегію переходу до «зеленої» сталі. Це частково зрозуміло через брак капітальних ресурсів у воєнний час, але несе ризик відставання. Конкуренти (наприклад, ArcelorMittal) вже інвестують у безвуглецеві технології, і після війни «КАМЕТСТАЛЬ» доведеться надолужувати, щоб відповідати екологічним вимогам ринків.

Вузькі місця технології: Освоєння нових продуктів на старому обладнанні – складне завдання. Розширення сортаменту (як з арматурою B500SP) потребувало великої команди і ручних доробок у процесах. Це свідчить, що технологічна гнучкість обладнання обмежена – кожна зміна потребує значних зусиль. Якщо ринки вимагатимуть більш частих змін (інша марка сталі, інший розмірний ряд), підприємству буде важко швидко переналаштовуватися. Також унікальне виробництво (вагонні

осі) залежить від наявності сировини відповідної якості – досі її постачала «Азовсталь», тепер довелося імпровізувати. Ці фактори зменшують стійкість інновацій: є ризик, що без стабільного постачання заготовок або модернізації стану по осі це виробництво знову може зупинитися.

Інновації vs. ризики якості: Швидке впровадження нових технологій чи продуктів може супроводжуватись проблемами якості. Наприклад, під час освоєння нових видів прокату можливий підвищений брак до відпрацювання технології. Комбінат вказує, що покращує властивості безперервнолитої заготовки і контролює якість арматури, але контроль якості потребує інвестицій у лабораторії, неруйнівний контроль тощо. Якщо через брак коштів ці речі недоофінансувати, інноваційна продукція може не відповідати заявленим стандартам і підірвати довіру клієнтів.

Лімітованість управлінських інновацій: У сфері менеджменту комбінат впровадив ряд прогресивних практик (наставництво, внутрішні ремонти, Lean-проекти). Однак деякі сучасні концепції управління виробництвом, такі як TPM (тотальне управління обладнанням), TQM (тотальне управління якістю), Six Sigma, поки не згадуються явно. Ймовірно, елементи їх є, але системність під питанням. В умовах, коли 90% української металургії зупинилося через війну, інноваційність управління могла б проявитися, наприклад, у глибшій диверсифікації діяльності (переробка брухту, виробництво нових матеріалів, а не тільки сталь). Поки що «КАМЕТ-СТАЛЬ» фокусується на своєму традиційному профілі, що в короткостроковій перспективі правильно, але стратегічно може обмежувати розвиток.

Фінансова стійкість розвитку: Заявлені інвестиції 2,5 млрд грн на рік – це значно менше у валютному еквіваленті, ніж довоєнні програми модернізації (менше ~\$60 млн). Для порівняння, повноцінна реконструкція доменно-конвертерного циклу чи будівництво електропечі потребує сотень мільйонів доларів. Отже, існує ризик, що інновації «малими кроками» не дозволять зробити якісний стрибок. Якщо війна затягнеться, підприємство може «проїдати» ресурси на підтримку працездатності, відкладаючи великі проєкти. Це пастка, що призводить до технологічного старіння. Необхідно залучати зовнішнє фінансування або державні програми після війни, інакше інноваційний розвиток буде надто повільним.

Екологічна стратегія та соціальна відповідальність

Екологічна політика комбінату «КАМЕТ-СТАЛЬ» визначається загальною стратегією Групи «МЕТІНВЕСТ» щодо поступового зниження впливу на довкілля шляхом модернізації виробництва та впровадження нових технологій. Підприємство сертифіковане за стандартом екоменеджменту ISO 14001 (з 2019 року) і має власну екологічну службу, що відповідає за контроль викидів, скидів і відходів. Основні напрямки екологічних програм – охорона атмосферного повітря, водних ресурсів, переробка відходів. В рамках модернізацій 2023–25 років реалізуються проєкти, прямо спрямовані на екологічне покращення. Зокрема, у 2025 році передбачено будівництво нового колектора доменного газу, що підвищить екологічну безпеку доменного виробництва (краще уловлювання і очищення доменного газу). Це дозволить знизити викиди забруднюючих речовин, особливо СО та пилу, з доменних печей. Також модернізація агломераційної фабрики (ремонт аглома-

шини №9) включає оновлення систем пилогазоочищення – заміна мультициклону, бункерів пилу, ущільнень – що зменшить викиди пилу в атмосферу. У цехах впроваджується більш ефективно пилопригнічення та аспірація на джерелах викидів. Екологічний аспект мають і енергоощадні заходи: наприклад, реконструкція печі у коксохімічному виробництві знизилася споживання пари за рахунок використання тепла коксового газу, що зменшує загальне споживання енергії і опосередковано скорочує викиди парникових газів.

У довгостроковій перспективі «КАМЕТ-СТАЛЬ» як частина «METINVEST» декларує курс на екологічну трансформацію – перехід до технологій меншого вуглецевого сліду. Група, наприклад, брала участь у розробці «Зеленої стратегії України» та планувала інвестиції \$2,6 млрд у проєкти зеленої металургії (до війни). Для самого комбінату це може означати перспективу будівництва електросталеплавильних потужностей замість мартенів (якщо б вони були) або замість частини конвертерів, а також впровадження технологій уловлювання вуглецю. Хоча конкретні проєкти відкладені через війну, компанія підкреслює, що курс на зелену трансформацію залишається незмінним. Окрім того, «КАМЕТ-СТАЛЬ» займається екологічною освітою: на початку 2023-го для студентів спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» було організовано виїзну сесію на підприємстві, де показали всю екосистему комбінату – від очисних споруд до біологічних ставків для очищення стічних вод. Студенти вчилися працювати з аналітичними приладами, відбирати проби, вивчали нормативну документацію, тобто комбінат демонструє відкритість і прозорість екопрактик перед майбутніми екологами. Це підтверджує соціальну відповідальність у

сфері екології – завод прагне відповідати сучасним стандартам і залучає науку й освіту до своїх процесів.

Соціальна відповідальність «Каметсталі» реалізується як через турботу про власний колектив, так і через підтримку громади міста Кам'янського. Підприємство традиційно є містоутворюючим і головним платником податків (у 2024 році комбінат збільшив сплату податків до бюджетів на 30% порівняно з попереднім роком). За підтримки акціонерів, навіть у воєнні часи, виділяються значні кошти на розвиток соціальної інфраструктури міста. У 2024 році «МЕТІНВЕСТ» інвестував 50 млн грн у модернізацію медичних закладів Кам'янського – відремонтовано відділення гінекології та травматології лікарні №9, реанімацію міської лікарні швидкої допомоги тощо. У 2025 році меморандумом з міськрадою передбачено 70 млн грн на соціально-економічний розвиток: кошти підуть на реконструкцію лікарень №7 і №9, оновлення обладнання, а також закупівлю п'яти нових трамваїв для міста. Керівництво «Каметсталі» підкреслює, що підприємство і місто пов'язані спільною долею: «сталева родина Каметсталі завжди допомагатиме Кам'янському... це наша історія, наше теперішнє і майбутнє» – зазначив гендиректор Олександр Третяков на церемонії відкриття відремонтованої поліклініки. Під час війни така співпраця бізнесу і влади особливо важлива: за словами мера міста, підтримка «Каметсталі» в ці важкі часи – свідчення соціальної відповідальності бізнесу та віри в майбутнє громади.

Для підтримки співробітників та їхніх сімей реалізуються корпоративні соціальні програми: допомога родинам мобілізованих, виплати пораненим, страхування життя. На комбінаті діє ветеранський хаб – осередок, де демобілізовані працівники можуть отримати психологічну

підтримку, консультації з перекваліфікації та просто спілкування з колегами. Такий хаб продовжує роботу як центр сили та підтримки для ветеранів, багато з яких після служби повертаються на підприємство (за повідомленнями, до 200 працівників «Каметсталі» вже демобілізовані і інтегруються назад)[^][Джерело: Facebook-сторінка Каметсталі, пост про ветеранський хаб]. Комбінат також опікується місцевими благодійними ініціативами: висадка дерев у місті (озеленення за участі ветеранів та молоді), підтримка дитячих спортивних секцій, участь у гуманітарних акціях в рамках проєкту «Сталевий фронт» Ріната Ахметова (допомога ЗСУ). Все це формує імідж «Каметсталі» як соціально-відповідального бізнесу, який не лише отримує прибуток, але й інвестує в людей і довкілля.

Критичний аналіз (екологія та соціальна відповідальність):

Вплив старих технологій: Незважаючи на зусилля з модернізації, комбінат все ще базується на технологіях доменно-конвертерного циклу та коксохімії, які априорі екологічно “брудніші” порівняно з електроплавкою чи сучасними «зеленими» технологіями. Обладнання 1960-70-х років (а багато агрегатів ДМК саме тих років) навіть після ремонтів не досягає показників найкращих доступних технологій по викидах. Наприклад, сумарні викиди пилу, CO₂, SO₂ залишаються високими. Є ризик, що комбінат може не вкладатися у майбутні жорсткі норми ЄС з викидів, особливо якщо планує експортувати продукцію (СВАМ – механізм вуглецевого коригування імпорту – фактично ставить ціну за вміст CO₂ у металі). Без кардинальної модернізації (декарбонізації) «КАМЕТ-СТАЛЬ» може зіткнутися з торговельними бар’єрами та штрафами на зовнішніх ринках до 2030-х років.

Екологічні ризики локально: Кам'янське історично страждало від забруднення повітря та вод промисловістю. Хоча зараз один з трьох доменних печей зупинений, а виробництво знижене, все одно комбінат є джерелом значних викидів. Населення міста може відчувати незадоволення екологічною ситуацією (пилові бурі від шлакових відвалів, запахи коксохіму). Якщо компанія не прискорить введення фільтраційних систем і рекультивацію відходів, це може спричиняти соціальну напругу, скарги, судові позови. Позитивні кроки (озеленення, еко-акції) поки що локальні і не компенсують загальний екослід.

Війна vs. екологія: Через бойові дії екологічні програми могли відійти на другий план (пріоритет – виживання виробництва). Наприклад, раніше планувалося будівництво сучасних газоочисток чи установок десульфурації, але їх реалізацію, ймовірно, відкладено. Натомість війна принесла додаткові проблеми: періодичні зупинки призводять до позапланових викидів при роздувках домен, ризик аварій. Оцінка впливу війни на екологію комбінату ще не зроблена, але можна припустити, що екологічні інвестиції скоротилися. Це зрозуміло, проте відставання в екомодернізації накопичується, і наздоженуть ці зобов'язання згодом дуже швидко і вимогливо.

Соцвідповідальність під навантаженням: Безперечно, «КАМЕТ-СТАЛЬ» багато робить для міста і людей під час війни. Але це також створює додаткове навантаження – фінансове і організаційне. Інвестиції в лікарні, транспорт – це кошти, які підприємство могло б спрямувати у власний розвиток, якби не екстрена ситуація. Поки Ахметов і компанія беруть цю ношу (програма «Сталевий фронт»), але якщо війна затягнеться чи фінансовий стан групи погіршиться, постане ди-

лема: продовжувати соціальні витрати або скорочувати їх заради збереження виробництва. Скорочення соцпрограм вдарить по репутації і моралі. Таким чином, стійкість CSR проектів під питанням – це багато в чому тримається на волі власників і надії, що держава частково підставить плече (наприклад, співфінансує відновлення міста).

Підтримка персоналу: Соціальна відповідальність перед працівниками випробовується масованою мобілізацією. Компанія заявляє про підтримку ветеранів, але на практиці масштаби проблеми великі – тисячі людей проходять через війну. Психологічна реабілітація, працевлаштування інвалідів війни, допомога сім'ям загиблих – все це довгострокові зобов'язання, які потребують системності. Є ризик, що окремі ініціативи (ветеранський хаб, виплати) не складуться в цілісну програму реінтеграції, і частина ветеранів може не знайти себе на виробництві або відчутти себе покинутими. Компанії варто готуватися до цих викликів, залучаючи профільних фахівців, інакше соціальна тканина колективу може постраждати.

Збалансування пріоритетів: Загалом «КАМЕТ-СТАЛЬ» прагне балансувати між виробничими планами, екологією та соціальною роллю. Однак у реальності пріоритет виробництва майже завжди буде першим (особливо під час війни, коли йдеться про збереження роботи заводу). Це означає, що екологічні та соціальні ініціативи завжди в зоні ризику бути урізаними першими при кризі. Відставання від сучасних екостандартів або недостатня увага до соціальних потреб може накопичуватися непомітно, але виявитися критичним, коли настане час поствоєнного відновлення і інтеграції в європейський простір. Комбінату доведеться надолужувати – і чим більше зараз прогалин, тим важче потім.

Зміни з початку повномасштабної війни 2022 року

Початок широкомасштабної війни в лютому 2022 року став переломним моментом, що вплинув на всі аспекти функціонування «Камет-сталі» та змусив змінити модель управління в умовах кризи. Операційна діяльність підприємства була істотно скоригована: у перші місяці війни комбінат продовжував працювати, хоча й з деяким зниженням навантаження (близько 80% потужностей станом на березень 2022, в основному через економію дорогого природного газу). Проте вже восени 2022 року ситуація різко погіршилася через масовані ракетні удари по енергетичній інфраструктурі України. 23 листопада 2022 р. внаслідок блекауту «КАМЕТ-СТАЛЬ» була змушена повністю зупинити виробництво – вперше за довгі роки завод одночасно заглушив доменні печі, конвертери і прокатні стани. Це була вимушена міра для безпечної зупинки в умовах відсутності електропостачання. Протягом наступних трьох тижнів проводилися аварійні ремонтні та діагностичні роботи. В середині грудня 2022, після часткового відновлення енергопостачання, комбінат відновив виплавку чавуну однією домною – поступово, обережно запускалося основне обладнання. На той момент сталеплавильне та прокатне виробництво ще не працювало – відновлення випуску сталі та прокату залежало від стабільності електромережі в регіоні. Фактично, комбінат перейшов у режим роботи мінімально достатнього рівня: одна домна з трьох, один конвертер з двох, короткі прокатні кампанії за наявності енергії. Це дозволило зберегти агрегати «теплыми» і уникнути їх аварійної консервації. Лише у міру покращення ситуації з електрикою на Дніпропетровщині взимку-весною 2023 вдалося поступово наростити виробництво. До осені 2024 року вже працювали дві доменні печі, а третя перебувала в стадії реконструкції. Таким чином, ключова зміна у виробничій моделі – перехід від повного завантаження

до гнучкого реагування на наявність ресурсів. Менеджмент перейшов на антикризове оперативне планування: швидко коригувати виробничі плани, перерозподіляти сировину між агрегатами, вирішувати, коли зупиняти або запускати окремі лінії залежно від ситуації.

Війна також зумовила зміни в постачанні сировини та збуті продукції. Традиційно комбінат отримував залізорудну сировину з криворізьких ГЗК і частково агломерат з Маріуполя, а коксове вугілля – з Авдіївського КХЗ. Після початку війни логістика перебудувалася: маріупольські активи були втрачені, тож сировинне забезпечення повністю лягло на внутрішні ресурси «МЕТІНВЕСТу» в підконтрольній Україні. Постачання руди стало орієнтованим на залізницю в західному напрямку (бо морські порти закриті), самі ГЗК працювали лише на 35-40% через падіння експорту руди. Це означало, що руди вистачало лише на зменшені обсяги виплавки чавуну, і пріоритет віддавався тим заводам, які можуть працювати – КАМЕТ-СТАЛЬ був серед них. Щоб завантажити прокатні стани, довелося знаходити альтернативи для слябів і блюмів: після втрати «Азовсталі» і ММК ім. Ілліча частково поклалися на внутрішнє виробництво заготовки (конвертерний цех Каметстали підлаштувався під потреби власного прокату), частково на імпорт слябів з ЄС за давальницькими схемами, за неофіційними даними. Збут продукції також змінився: внутрішній ринок скоротився, тож довелося агресивніше виходити на європейський. Експортна стратегія переорієнтувалася – якщо раніше значна частка експорту йшла через морські порти (більше на Близький Схід, Африку), то з 2022 року основним напрямком став ЄС (Польща, балканські країни) через західний кордон. Відповідно, асортимент швидко адаптували: сертифікація ар-

матури під євростандарти, поставки квадратної заготовки до італійських і британських заводів групи (поки вони не зупинилися). Комбінат опинився у нових логістичних умовах – довші маршрути, вищі тарифи УЗ, необхідність бронювати вагони і пропускну здатність переходів. Це викликало збільшення витрат на логістику і вплинуло на прибутковість продажів, змусивши менеджмент шукати шляхи оптимізації перевезень, працювати напяму з Укрзалізницею щодо виділення рухомого складу.

Управління персоналом зазнало чи не найбільших змін. На 24 лютого 2022 на комбінаті працювали тисячі працівників, більшість з яких – чоловіки призовного віку. Після оголошення загальної мобілізації частина колективу була призвана або добровільно пішла до війська. Спочатку, через зменшення обсягів виробництва, навіть був надлишок робочої сили, проте згодом, коли стабілізували роботу та багато хто пішов на фронт, виник гострий дефіцит кадрів. Компанія відреагувала згаданими програмами адаптації та залучення жінок на виробництво. До війни на комбінаті жінки працювали лише в деяких цехах, зараз їх почали брати на посади електромонтерів, машиністів конвеєрів тощо – там, де це фізично можливо, щоби замістити мобілізованих чоловіків. Організація праці теж змінилася: більше уваги приділяється багатофункціональності працівників (щоб при нестачі люди могли виконувати суміжні операції), активно використовуються надурочні, змінні графіки переглядаються для забезпечення критичних постів. Також воєнний час спонукав переглянути підходи до охорони праці та безпеки – на підприємстві обладнані укриття, проводяться регулярні тренування персоналу щодо дій під час повітряних тривог. Керівництво зазначає, що на-

віть у складний воєнний час пріоритет – створення комфортних і безпечних умов для працівників. Практично це означало інвестиції в укріплення бомбосховищ на території комбінату, забезпечення резервного живлення критичних об'єктів (щоб люди не опинилися в шахтах ліфтів чи підземних комунікаціях без світла), впровадження систем оповіщення.

Управлінська структура зазнала певної централізації в кризовий період. Група «МЕТІНВЕСТ» створила антикризовий штаб, де рішення по виробництву, постачанню, збуту координувались централізовано для всіх підприємств. Для «Каметсталі» це означало швидке доведення розпоряджень згори – наприклад, про пріоритети енергопостачання, про участь у волонтерських ініціативах («Сталевий Фронт»). Водночас локальне керівництво отримало більше повноважень у питаннях оперативної реакції: дозволялося самостійно ухвалювати рішення про короткострокові зупинки або запуски агрегатів залежно від ситуації в енергетиці, не чекаючи тривалих погоджень. Це певною мірою децентралізація оперативного управління в межах загальної централізації стратегічної – парадокс, але ефективний у кризу.

Зміни торкнулися і корпоративної культури. Якщо до війни акцентувалося на ефективності та прибутковості, то з 2022 р. на перший план вийшла стійкість і згуртованість. Менеджмент відкритіше комунікує з персоналом, пояснює складність ситуації, досягнення комбінату подаються як спільна перемога. З'явився слоган «Сталевий фронт», працівники пишаються внеском у економічну оборону країни. Така зміна нарративу підвищує мотивацію – люди відчують, що їхня праця важлива не лише для компанії, а й для всієї України. Комбінат став

більш соціально орієнтованим: розширено програми допомоги (як уже зазначено, сім'ям військових, місту).

Критичний аналіз (воєнні зміни):

Зниження виробничих показників: Неминучим наслідком війни стало різке падіння обсягів виробництва сталі в Україні (~–69% у 2022 р. порівняно з 2021). «КАМЕТ-СТАЛЬ», будучи єдиним великим меткомбінатом на підконтрольній території, теж виробив у 2022 році лише ~1,56 млн т сталі, що значно менше від проектної потужності (3,5 млн т). Це означає недовикористання потенціалу, високі собівартості через неповне завантаження. Хоча у 2023-24 рр. ситуація дещо покращилася, вийти на довоєнний рівень поки що нереально. Для менеджменту це виклик: підтримувати мотивацію і фінансову стабільність, працюючи на 50-80% можливостей, і не дати підприємству скотитися в збитковість.

Стрес та зношення обладнання: Часті пуски-зупинки агрегатів – режим, не типовий для металургії (де краще працювати безперервно). Аварійні відключення, коливання температур у печах, простої – все це веде до прискореного зносу обладнання. Є ризик росту аварійності і позапланових ремонтів, що додатково ускладнює виробництво. Менеджмент вже стикався з цим і намагається проактивно ремонтувати (наприклад, зробили капремнти поки все одно працювали на півсили). Але якщо війна знов призведе до блекаутів, обладнання може цього разу постраждати сильніше.

Непередбачуваність планування: Війна фактично паралізувала довгострокове планування. Бюджети складаються поквартально, а то й помісячно, бо ситуація змінюється. Інвестиційні проекти доводиться

розбивати на етапи або заморожувати частково (якщо раптом загострення на фронті або нові удари по енергетиці). Ця невизначеність – кошмар для управління: неможливо гарантувати строки, контракти порушуються, доводиться постійно переглядати плани. Це виснажує і менеджерів, і персонал, породжує синдром «пожежного» режиму роботи. У такій атмосфері страждає стратегічний розвиток – реагуючи на щоденні виклики, легше втратити з поля зору довготермінові цілі.

Фінансовий тиск: З війною прийшли і фінансові втрати: логістика подорожчала, енергоносії (газ, електрика з генераторів) теж, внутрішній попит впав. У 2022 році «МЕТІНВЕСТ» зазнав чистого збитку вперше за багато років, отже «КАМЕТ-СТАЛЬ» також працювала не з таким прибутком, як раніше. Це призвело до скорочення резервів – на премії, на модернізацію. Так, зарплати індексуються, але не встигають за інфляцією; якісь бонуси могли урізати. Для працівників це відчутно і може погіршувати моральний стан. Кредитування на модернізацію фактично недоступне через ризики. Таким чином, фінансові обмеження стримують потенційні позитивні зміни: деякі проекти розвитку, заплановані до війни, відклали. Ризик у тому, що по завершенні війни підприємство може опинитися в боргах чи з потребою робити надто багато одночасно – наздоганяти конкуренцію, ремонтувати зношене, відновлювати соціальний пакет для втомленого колективу.

Кадрові довгострокові наслідки: Масова мобілізація призведе до того, що певний відсоток працівників не повернеться (через поранення, загибель, переїзд). Це жорстока реальність, яка значить втрату людського капіталу. Звичайно, на їх місце стануть нові, але досвід і навички не передати миттєво. До того ж, психологічний стан тих, хто повер-

неться, може впливати на атмосферу – ПТСР, професійна переорієнтація, зміна пріоритетів у людей (комусь після фронту важче буде миритися з заводською дисципліною, комусь навпаки завод стане тихою гаванню). Менеджменту треба готувати програми реабілітації, інакше текучість зросте.

Позитивні зрушення: Водночас криза виявила і сильні сторони: підприємство продемонструвало стійкість, не дало «погаснути домам». Цей досвід зробив команду загартованішою і змусив вчитись працювати в екстремальних умовах. Виникла культура антикрихкості: швидке відновлення осьового виробництва для УЗ, перенастроювання на інші ринки – все це свідчить про вміння знаходити можливості в кризі. Якщо менеджмент збереже цю динамічність і після війни, «КАМЕТ-СТАЛЬ» може здійснити стрибок у розвитку, використовуючи набуті навички гнучкості. Головне – не повернутися повністю до «як раніше». Як зазначалось у галузевому огляді, «як раніше – не буде», і людина (персонал) стала головною опорою української металургії зараз. Отже, зміни, що сталися – це і виклики, і можливості для глибшої трансформації моделі менеджменту комбінату у майбутньому. У таблиці 2.16 зображено SWOT-аналіз Каметсталі.

Табл. 2.16 – SWOT-аналіз Каметсталі

Продовження табл. 2.16

--	--	--	--

2.5 Висновки та стратегічний напрям трансформації

Стратегічне порівняння моделей модернізації

Інвестиції vs ефект. Модель 1 потребує в рази більших капіталовкладень (~\$2,2 млрд проти ~\$0,35 млрд), але дає радикальні результати у декарбонізації (-50% CO₂) та формує фундамент довгострокової конкурентоспроможності. Модель 2 — «малими коштами» вирішує локальні питання ефективності та розширення продуктової лінійки, проте не змінює суттєво вуглецевий слід і не усуває залежності від імпортового коксу та вуглецевих технологій.

Рентабельність.

Етапність реалізації. Модель 2 логічно розглядати як перший етап. Вона дозволяє швидко покращити економічні показники, створити нові ринки збуту та накопичити ресурс для реалізації масштабного пе-реходу до моделі 1. Побудована МБЛЗ може бути інтегрована у майбу-тній комплекс DRI+EAF — тобто інвестиція не втрачає актуальності.

Висновок:

Для ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» доцільним є комбінований підхід:
реаліза-

ція моделі 2 у короткостроковій перспективі для швидкого ефекту й ринкової присутності, з подальшим переходом до моделі 1 як до основи низьковуглецевого сталеплавильного комплексу. Це відповідає логіці розвитку Metinvest: спершу модернізація розливки та апробація рішень, далі — інвестиції в повноцінне «зелене» виробництво сталі в Україні.

Ключові висновки щодо чинної моделі менеджменту (до модернізації)

Централізована структура управління з обмеженими можливостями децентралізації. Поточна система управління зосереджена на вертикальному прийнятті рішень, що частково обмежує ініціативу середньої ланки та ускладнює швидку адаптацію до змін. Є потреба у більш гнучкому розподілі управлінських функцій і розширенні ролі виробничих команд.

Кадровий підхід зі збереженням традиційних управлінських підходів.

У стилі керування переважають перевірені адміністративні практики, що забезпечують стабільність, проте можуть стримувати впровадження сучасних управлінських інструментів і цифрових рішень. Існує потенціал для оновлення управлінської культури з акцентом на гнучкість, проектне управління та мотиваційні моделі.

Низький рівень діджиталізації управлінських процесів. Окремі ділянки виробництва автоматизовані, однак інтеграція IT-рішень у сферу управління персоналом, планування, логістики та контролю процесів слабо розвинена. ERP-системи, наскрізна аналітика (BI), штучний інтелект у прийнятті рішень не використовуються в повному обсязі.

Обмежена комунікація між рівнями. Комунікація має переважно односторонній характер — від керівництва до працівників. Зворотній зв'язок формальний або відсутній, що знижує залученість персоналу до змін.

Нерозвиненість системи управління знаннями. Відсутня сучасна модель трансферу знань між поколіннями. Немає цифрових платформ знань, корпоративного навчання, e-learning-систем.

Високий рівень кадрового виснаження та вигорання. Війна, економічна нестабільність і стресові умови призвели до втрати кваліфікованих кадрів, зниження мотивації й емоційного вигорання. Молоді кадри слабо інтегровані в управлінську вертикаль, відсутні програми наставництва.

Відсутність сталої системи змін та стратегічного управління. Управління має реактивний характер. Відсутні проєктні офіси, change management-системи та культура управління змінами. Модернізація реалізується адміністративно, а не через трансформацію людей і процесів.

Соціальна функція не трансформована. Хоча підприємство виконує соціальні зобов'язання, вони не інтегровані у сучасну ESG-стратегію, побудову партнерства з громадою або систему корпоративної соціальної відповідальності (CSR).

Напрямки подальшої трансформації менеджменту

Для забезпечення успішної реалізації технологічної модернізації КАМЕТ-СТАЛЬ має:

Впровадити проєктне управління та гнучкі підходи (Agile, Lean, Kanban) через створення РМО, інтегруючи принципи Kaizen як основи культури безперервного вдосконалення.

Розвивати цифрову інфраструктуру управління: ERP, BI, автоматизацію HR, логістики, фінансів.

Формувати інноваційну культуру: підтримка командної роботи, наставництва, менторства.

Побудувати систему управління змінами (Change Management) з аналізом ризиків і залученням персоналу.

Розвивати корпоративне навчання: внутрішні академії, e-learning, платформу передачі знань.

Оновити соціальну політику, інтегрувавши підходи ESG, залучення молоді та партнерство з громадою.

3. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ КОМБІНАТУ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

3.1 Оновлена модель управління комбінатом

На рівні всього комбінату пропонується перехід до цифрово орієнтованої, гнучкої структури управління, здатної підтримувати швидкі зміни та інновації.

Основні елементи нової моделі:

Дані та інтеграція в центрі ухвалення рішень: Усі ключові виробничі процеси генеруватимуть великий обсяг даних у режимі реального часу. Новий МБЛЗ, зокрема, оснащено тисячами датчиків, що відстежують параметри якості та ходу виробництва. Ця інформація надходить до єдиної платформи (рівень Level 2/3 АСУТП та Q3 Intelligence від Daniela) і далі інтегрується в ERP SAP. Керівництво комбінату отримує доступ до актуальних KPI виробництва, що забезпечує проактивний моніторинг та швидке реагування на відхилення. Таким чином, управлінські рішення ґрунтуються на достовірних даних, а не на припущеннях, що підвищує ефективність і оперативність.

Зміна організаційної структури та ролей: Створюється міжфункціональний офіс цифрової трансформації або залучаються Digital-лідери в існуючій ієрархії. Їх завдання – координація IT-служб, автоматників та виробничників для спільної роботи над цифровими проектами. Традиційні відділи (виробничий, технічний, IT, ОТК тощо) починають працювати більш інтегровано. Наприклад, до виробничих підрозділів можуть бути закріплені фахівці з аналізу даних та автоматизації. В сучасних металургійних компаніях уже з'являються нові ролі – фахівці з AI, програмісти додатків – які працюють пліч-о-пліч із доменними інженерами

та операторами. Така міждисциплінарна структура сприяє швидкому впровадженню інновацій і вирішенню проблем, що виникають на стику ІТ та виробництва.

Децентралізація оперативного управління та Agile-підходи: Запроваджується практика автономних виробничих команд (на рівні цехів і дільниць), наділених чіткими показниками результативності та повноваженнями для швидкого вирішення поточних питань. Принципи Agile дозволяють розбивати великі проекти (такі як введення нового обладнання) на короткі цикли/етапи з проміжними результатами, що дає змогу гнучко реагувати на зміну умов і вимог. Наприклад, мультидисциплінарна команда з інженерів МБЛЗ, ІТ-спеціалістів та технологів може працювати за спринтами над налаштуванням нової МБЛЗ, щотижня звітуючи про прогрес і коригуючи плани (Agile-підхід у проектному менеджменті впровадження). Це підвищує швидкість реалізації змін і залученість персоналу.

Lean-менеджмент і стандартизація: В основі моделі – принципи бережливого виробництва (Lean), що фокусуються на оптимізації процесів, усуненні втрат та максимальному створенні цінності для клієнта. На рівні комбінату запроваджується аналіз потоків створення цінності (Value Stream Mapping) для всього виробничого ланцюга – від виплавки сталі до відвантаження продукції. Це допоможе виявити вузькі місця, зайві операції чи запаси і перебудувати процеси відповідно. Стандартизована робота встановлюється для типових операцій: розробляються та документуються оновлені регламенти для нових цифрових процесів (наприклад, порядок дій оператора МБЛЗ при роботі в автоматизованому режимі, протоколи реагування на аварійні сповіщення системи тощо). Стандартизація зменшить вплив людського фактора та

варіативність, забезпечуючи стабільну якість. Водночас керівництво застосовує візуальний менеджмент – цифрові інформаційні дошки у цехах відображають статус виробництва, простої, якість, що дозволяє всім швидко оцінити ситуацію і вживати заходів.

Культура безперервного вдосконалення (Kaizen): Нова модель менеджменту передбачає активне залучення працівників усіх рівнів до процесу покращень. Кожен цех впроваджує програми збору пропозицій від персоналу щодо підвищення ефективності, якості, безпеки. Малими групами проводяться регулярні *Kaizen-сесії* для аналізу проблем і впровадження поліпшень. Керівництво підтримує ініціативи працівників та швидко впроваджує вдалі ідеї. Така культура вже довела ефективність: компанії, що застосовують Kaizen, досягають поступового але невпинного зростання продуктивності. Lean-підхід наголошує: працівники, безпосередньо залучені у процес, найкраще знають його “вузькі місця”, тому їхні пропозиції особливо цінні. Формування культури постійних поліпшень дозволить «Каметсталі» гнучко адаптуватися і після завершення основної фази модернізації.

Орієнтація на якість та клієнта: Завдяки новим технологіям підприємство зможе краще контролювати параметри продукції і відповідати зростаючим вимогам ринку. Система Q-CAST від Danieli, інтегрована в МБЛЗ, здійснює автоматичний моніторинг якості розливки в режимі онлайн – передбачено оцінку якості в реальному часі та оптимізацію різання заготовок для підвищення виходу придатного металу. Дані з виробництва можуть бути використані не тільки внутрішньо, але й надані клієнтам: наприклад, за досвідом *Thyssenkrupp Steel*, замовники в майбутньому зможуть відстежувати статус свого замовлення та окремі

показники якості ще до відвантаження металу. Таким чином, менеджмент комбінату переходить від просто виробництва продукції до надання сервісу високої прозорості та надійності для клієнтів, що є ознакою сучасного підходу.

3.2 Структура управління підрозділом МБЛЗ

Безпосередньо в новому підрозділі машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) управління та організація праці зміняться найбільш відчутно. Однорукавна слябова МБЛЗ з цифровим керуванням вимагає меншого числа працівників на зміні, але висуває вищі вимоги до їх кваліфікації. Оновлена структура підрозділу може виглядати так:

Операторський центр (пульт управління): Замість кількох постів ручного керування, як це було на старій сортовій МБЛЗ, запроваджується єдиний операторський центр. Головний оператор МБЛЗ контролює процес розливки через програмний інтерфейс Danieli. Система підтримує автоматичний пуск та зливок (“автостарт”), автоматичне регулювання рівня металу в кристалізаторі, вторинне охолодження тощо. Завдання оператора – нагляд за роботою автоматики та втручання лише у разі відхилень або позаштатних ситуацій. Практика показує, що сучасна МБЛЗ типу СС4 у Донавіці (voestalpine) дозволяє повністю автоматизувати процес розливки та переміщення заготовок без безперервної ручної участі. Отже, один оператор може виконувати те, що раніше вимагало зусиль кількох людей, за рахунок чого підвищується продуктивність і зменшується людський фактор.

Інженер автоматизованих систем (інженер АСУТП): Нова позиція або розширена роль, відповідальна за підтримку програмно-апаратних

комплексів МБЛЗ. Цей фахівець забезпечує працездатність систем Level 1/Level 2 (контролери, датчики, мережа) та взаємодію з рівнями MES/ERP. В його обов'язки входить моніторинг програмних алгоритмів (наприклад, системи експертного контролю якості Q-CAST), діагностика можливих збоїв, оновлення програмного забезпечення та співпраця з IT-відділом. Простіше кажучи, якщо головний оператор «веде» процес, то інженер АСУТП «веде» саму систему. Це критична роль для цифрового виробництва, адже від безперебійної роботи датчиків і контролерів залежить увесь процес. На практиці, наприклад, на Big River Steel (США) подібні спеціалісти слідкують за тисячами датчиків та використовують аналітичні дані, аби передбачати і унеможливлувати появу дефектів ще до їх виникнення.

Інженер металург (технолог МБЛЗ): Ця роль зберігається, проте акцент зміщується на аналітику процесу та якість. Завдяки глибині даних, які надає цифрова система, технолог може у реальному часі відстежувати температурно-швидкісні режими, взаємозв'язок параметрів розливки з якістю слябів, передбачати утворення внутрішніх дефектів (усадок, сегрегацій) тощо. Інструменти на кшталт динамічного м'якого редукування (Q-CORE) дозволяють оптимізувати солідусну усадку для покращення якості слябів на льоту. Технолог МБЛЗ тепер приймає рішення не «на око», а спираючись на підказки експертних систем і моделювання. У разі відхилень він оперативно коригує технологічні параметри або ініціює додаткові заходи (наприклад, примусове перемішування електромагнітними мішалками, якщо якість сталі потребує покращення). Приклад: нова МБЛЗ-4 у Донавіці обладнана автоматизованою системою температурного контролю та мішалками, що гарантують

однорідність структури металу. В результаті досягається висока чистота сталі та відсутність поверхневих тріщин, але водночас роль людини – стежити за цими системами і розуміти, як їх налаштування впливають на метал.

Обслуговуючий персонал (бригади зміни): На кожну зміну формується компактна бригада, до складу якої входять: головний оператор, 1-2 помічники оператора (контролюють окремі ділянки – прийом ковша, різання слябів, випуск на рольганг), слюсар-ремонтник (чергує для оперативного дрібного ремонту механіки), електрик/електронщик (для обслуговування електрообладнання та систем управління). Таким чином, чисельність зміни МБЛЗ може бути скорочена, приміром, з умовних 10 осіб (на старій машині) до 5-6 осіб на новій, без втрати контролю за процесом. Це досягається автоматизацією ряду операцій: подача та встановлення ковша, контроль рівня металу, зміна мідних плит кристалізатора, різка заготовок та їх штабелювання – все це виконує автоматика або роботизовані механізми. Зокрема, передбачається впровадження роботизованих систем типу LiquiRob на робочій площадці розливки для небезпечних операцій (пробовідбір, промір температури і т.д.), що значно підвищує безпеку і знижує потребу у ручній праці. У результаті основне завдання бригади – нагляд і координація, а не фізичне виконання дій.

Система управління якістю та відбраковування: Відділ технічного контролю (лабораторія) тепер тісніше інтегрується з МБЛЗ. Дані з онлайн-систем (температура, швидкість витікання, параметри охолодження) поєднуються з результатами аналізів готових слябів. Це дозволяє прогнозувати якість ще на етапі розливки. Програмне забезпечення (Danieli Q3) навіть здійснює автоматичну оцінку якості кожного

сляба в реальному часі, сигналізуючи, якщо він потенційно не відповідає вимогам. Таким чином, співробітники ОТК працюють проактивно: вони отримують повідомлення від системи і можуть прийняти рішення про перенаправлення сляба на перелив або додаткову обробку, не чекаючи кінцевого виробництва. Це зменшує втрати на брак і переробку. Управління підрозділом МБЛЗ, відповідно, передбачає тісну взаємодію технологів, операторів та контролерів якості в єдиному інформаційному просторі.

Загалом, структура підрозділу МБЛЗ стане більш технологічною, менш чисельною, але більш кваліфікованою. Комунікації набудуть горизонтального характеру – оператор, технолог, автоматник і ремонтник в зміні працюють як одна команда, що відповідає за результати розливки. Керівник підрозділу (начальник МБЛЗ) зосередиться на аналізі показників ефективності (продуктивність, витрати металу на метр, відсоток браку, простої) та реалізації заходів по їх покращенню, а не на ручному «гасінні пожеж». Важливо зазначити, що навіть при повній автоматизації людський фактор залишається критичним: як зауважив директор підрозділу voestalpine Franz Kainersdorfer, успішна робота нової цифрової МБЛЗ залежить передусім від неперевершеного досвіду та експертизи працівників. Це підкреслює необхідність інвестувати в навчання і розвиток персоналу паралельно з технологічними інвестиціями.

Оптимізація чисельності персоналу та автоматизація

Впровадження повної цифровізації процесів неминуче призведе до скорочення потреби в окремих робітничих спеціальностях та змін у чисельності персоналу. Автоматизація рутинних, важких і небезпечних операцій дозволить підприємству зменшити прямі трудовитрати, підви-

щити безпеку та уникнути людського фактора в критичних точках. Водночас звільнені ресурси можна спрямувати на розвиток нових компетенцій і підвищення продуктивності. У цій секції розглянемо, яких змін знає чисельність персоналу та як раціонально керувати цими змінами.

Очікуване скорочення персоналу на МБЛЗ: Як зазначено вище, на новій МБЛЗ кількість операторів та допоміжних робітників у зміні зменшиться приблизно наполовину. Аналогічний досвід наводить металургійна галузь ЄС: цифрова трансформація та Industry 4.0 загалом зменшують потребу в фізичній, монотонній праці, але водночас збільшують попит на висококваліфікованих працівників. Тож, хоча кількість посад скоротиться, залишаться або з'являться нові посади з вищими вимогами (автоматники, інженери з даних, ІТ-спеціалісти). Відповідно до принципів Lean, людей слід вивільняти від рутинних операцій, аби вони могли займатися більш цінними для виробництва завданнями.

Перерозподіл і перепрофілювання працівників: Скорочення чисельності не означає одномоментних звільнень. Рекомендується скласти поетапний план:

Частина працівників пенсійного та передпенсійного віку залучити до програми добровільного виходу або дострокової пенсії (за згодою), з відповідними компенсаціями.

Кваліфікованих робітників, що вивільняються (наприклад, сталеварів, розливальників, операторів старої МБЛЗ), перепідготувати на суміжні або нові ролі. Дехто з них може опанувати роботу на новому обладнанні (за умови навчання цифровим навичкам), інші – перейти до суміжних цехів, де їхній досвід знадобиться (наприклад, у прокатному виробництві або на ділянках підготовки виробництва).

Розробити програму внутрішніх стажувань: поки триває монтаж нової МБЛЗ, працівники старої установки можуть бути залучені до проектної групи як експерти з процесу – це утримає їх зайнятими і дасть відчуття причетності до змін. Після запуску частина з них залишиться в команді, а частина – перейде в резерв або інші підрозділи.

Забезпечення соціальної стабільності: Комбінат має у співпраці з відділом персоналу та профспілками підготувати програму соціальної підтримки для тих, кого торкнеться оптимізація. Це можуть бути виплати вихідної допомоги, допомога у працевлаштуванні на інших підприємствах Групи «МЕТІНВЕСТ» або в регіоні, участь у державних програмах перекваліфікації. Прозора комунікація і поетапність дій дозволять уникнути демотивації та соціальної напруги. Change Management відіграє тут ключову роль: потрібно від початку донести працівникам мету змін, вигоди для підприємства і для них, а також показати шляхи розвитку для тих, хто готовий навчатися.

Зростання продуктивності та ефективності: У результаті автоматизації очікується суттєве зростання продуктивності праці (тонн сталі на одного працівника). Скорочення непрямого персоналу (планувальники, обліковці) також можливе за рахунок впровадження єдиної цифрової системи планування та обліку в SAP. Наприклад, завдяки інтеграції МБЛЗ з ERP, процеси планування виробництва і формування звітності будуть автоматизовані, тож потреба в ручному введенні даних відпаде. Загалом комбінат зможе досягти більш ощадливої структури затрат на персонал, що особливо важливо в умовах зростання конкуренції та воєнних ризиків.

Безпечніші та якісніші робочі місця: Скорочення чисельності сто-сується передусім важкої фізичної праці та небезпечних робіт (зона розливи, контакт з розплавом, газами). Натомість залишаються робочі місця оператора пульта, інженера, техника – тобто ті, що менше піддаються ризикам і краще оплачуються. Таким чином, відбувається еволюція професійної структури: зменшується частка низькокваліфікованої праці, збільшується частка інтелектуальної, інженерної. Це відповідає загальносвітовій тенденції: у сучасних сталеливарних компаніях чисельність персоналу знижується, але рівень навичок і компетенцій зростає, і підприємства шукають можливості розвивати власні кадри під ці потреби.

Важливо розуміти, що скорочення персоналу – не самоціль, а наслідок технологічного прогресу. Менеджмент комбінату повинен використати цю можливість для оптимізації витрат, але зробити це відповідально. Вивільнення людей від рутинних операцій відкриває шлях до їх ефективнішого використання: кращі працівники можуть стати наставниками, операторами нових процесів або агентами змін, які допомогатимуть колегам опановувати цифрові інструменти.

Паралельне навчання і перепідготовка працівників

Для успішного запуску нової МБЛЗ недостатньо змонтувати обладнання – необхідно, щоб персонал був готовий ефективно ним користуватися з першого дня. Тому програма навчання та перепідготовки кадрів має відбуватися паралельно з проектуванням, будівництвом та пусконаладженням. Пропонується поетапна модель навчання, що охоплює всі фази проекту: від підготовки до експлуатації.

Паралельно з технічним навчанням, необхідно розвивати і «м'які» навички персоналу для роботи в нових умовах. Це включає базову цифрову грамотність, уміння працювати в команді, адаптивність до змін. Керівникам середньої ланки (майстрам, начальникам змін) корисно пройти тренінги з лідерства в умовах змін та управління змінами (Change Management), щоб вони стали провідниками нововведень для підлеглих.

Особливу увагу слід приділити зміні мислення: замість виконання окремих операцій працівники мають розуміти загальний процес і свою роль у ньому. Наприклад, оператор МБЛЗ повинен розуміти, як його дії впливають на роботу прокатного стану, а електрик – усвідомлювати важливість стабільної роботи сенсорів для якості сталі. Для цього ефективними є круглі столи, де працівники суміжних професій обмінюються знаннями про процес.

В підготовці кадрів до цифрової трансформації добре зарекомендував себе підхід «Train the Trainer» – навчання внутрішніх тренерів з числа наших кращих працівників. Уже на етапі стажування та пуску варто визначити лідерів (наприклад, найдосвідченіших операторів, які швидко освоїли нову систему) і надати їм додаткові знання педагогічного плану. В подальшому вони стануть наставниками для решти колективу та нових співробітників. Це відповідає концепції TWI Job Instruction, за якою досвідчений працівник системно навчає колег і таким чином забезпечується швидке тиражування ноу-хау на виробництві.

Отже, навчання і виробництво йдуть пліч-о-пліч протягом усього проекту. Така інвестиція в людей є критично необхідною: навіть найсучасніша технологія не дасть результату, якщо персонал не володіє нею

повною мірою. До моменту офіційного введення МБЛЗ №3 в експлуатацію колектив має бути впевненим, що знає, як керувати процесом і як реагувати на будь-які ситуації – від збоїв автоматики до нестандартних вимог замовника. Цього і досягне модель паралельного навчання.

Сучасні підходи в менеджменті для максимального ефекту

Успіх настільки масштабної модернізації залежить не лише від техніки, але й від стилю управління та корпоративної культури. Запропонована модель спирається на кращі сучасні практики менеджменту, адаптовані до промислового контексту. Нижче узагальнено, як саме концепції Lean, Change Management, Agile, Digital Leadership, Kaizen, TWI тощо інтегруються в управління «Каметсталлю»:

Бережливе виробництво (Lean Management): Як вже зазначалося, lean-принципи лежать в основі оптимізації процесів на комбінаті. Менеджмент фокусується на усуненні всіх видів втрат – зайвих переміщень, очікування, перепрацювання, дефектів тощо. Для цього впроваджується система пропозицій: працівники можуть повідомляти про виявлені неефективності, а команда Lean-координаторів аналізує та допомагає реалізувати поліпшення. Важливим є підхід Just-in-Time – гнучке планування виробництва відповідно до реального попиту, щоб не створювати зайві запаси. ERP-система SAP, інтегрована з виробництвом, дозволить у реальному часі коригувати плани випуску під замовлення, мінімізуючи надлишкову продукцію. Також Lean включає Total Productive Maintenance (TPM) – всеосяжне обслуговування обладнання. На практиці це означає залучення операторів до планового дрібного обслуговування МБЛЗ (наприклад, перевірка стану форсунок охолодження, змащення механізмів) і перехід від аварійних ремонтів до профілактичних. Результат – максимум часу роботи обладнання та

мінімум незапланованих простоїв. Lean-менеджмент формує культуру, де кожен працівник розуміє цінність своєї роботи для клієнта і постійно думає, як зробити краще – швидше, якісніше, дешевше.

Управління змінами (Change Management): Перетворення такого масштабу – серйозний виклик для організації, і ними необхідно професійно керувати. План впровадження модернізації супроводжується планом управління змінами, що включає: аналіз зацікавлених сторін (кого і як торкнуться зміни), комунікаційну стратегію (регулярне інформування колективу про хід проекту), керування опором (виявлення і робота з джерелами невдоволення чи страху серед працівників). Керівники усіх рівнів проходять навчання методикам Change Management, таким як модель Коттера (створення відчуття терміновості, формування коаліції однодумців, швидкі перемоги тощо). Працівників залучають до процесу – через опитування, фокус-групи – аби вони відчували свою участь. Важливо відзначити успіхи: наприклад, після запуску нової МБЛЗ відзначити тих, хто зробив найбільший внесок, оприлюднити досягнуті перші результати (скажімо, поліпшення якості, збільшення випуску) і привітати команду. Це закріпить позитивне сприйняття змін. Change Management в даному контексті забезпечить, що технологічна революція стане й еволюцією культури – гнучкішою, інноваційнішою, орієнтованою на розвиток.

Гнучкість та Agile в управлінні виробництвом: Традиційно металургія – досить консервативна галузь з жорсткою ієрархією. Проте сучасні виклики (волатильність ринків, переривання ланцюгів постачання, воєнні ризики) вимагають більшої гнучкості. Принципи Agile можна адаптувати і до промислових умов. Наприклад, замість довгострокового плану ремонтів, що затверджується раз на рік, перехід до квартального

планування із щомісячним коригуванням (підхід Rolling Wave). В управлінні проектами – використання Scrum-підходу: регулярні наради-статуси, перегляд пріоритетів, невеликі крос-функціональні команди на час виконання окремих завдань. Agile-методологія наголошує на швидкому отриманні зворотного зв'язку та адаптації – це особливо цінно при освоєнні нових технологій. Ми вже застосували елементи Agile при навчанні (спринти на освоєння навичок) та при впровадженні (поетапний запуск). Надалі комбінат може продовжити практику «пілотних впроваджень» і мінімально життєздатних рішень (MVP) у всіх сферах – від IT-систем до нових продуктів. Філософія Agile-виробництва полягає у здатності компанії швидко переналаштовувати процеси під зміну вимог, зберігаючи при цьому якість та контроль за витратами. Це дасть «Каметсталі» конкурентну перевагу, дозволяючи оперативно реагувати на потреби ринку та замовників.

Цифрове лідерство та розвиток талантів: В цифрову епоху роль керівника виходить за межі адміністрування – він має бути лідером змін та наставником. Менеджери комбінату повинні демонструвати підтримку цифрових ініціатив, особисто використовувати нові системи (наприклад, аналітичні дашборди), щоб подавати приклад підлеглим. Розвиток digital-навичок є обов'язковим і для управлінців: розуміння базових принципів роботи з даними, кібербезпеки, можливостей Industry 4.0. Варто запровадити програму підготовки «Digital Leadership» для керівного складу. Вона навчить, як управляти командою знанієвих працівників, як впроваджувати інновації, керувати віддаленими командами, оцифровувати процеси. Digital-лідери сприятимуть формуванню середовища, де працівники не бояться експерименту-

вати, вчитися і пропонувати новаторські рішення. Також важливим аспектом є управління поколіннями: на підприємстві одночасно працюють досвідчені фахівці старшого віку і молоді працівники, які виростили в цифровому світі. Лідери повинні зуміти поєднати сильні сторони обох: використати експертизу ветеранів та цифрову грамотність молоді. Дослідження відзначають, що в металургії старше покоління часто менш комфортно почувається з цифровими інструментами і іноді скептично ставиться до них. Завдання керівника – змінити цей наратив, показати користь технологій і забезпечити менторство, аби передати багаторічні знання у поєднанні з новими методами. Digital leadership також проявляється у побудові партнерств – з технологічними компаніями, з університетами – для постійного притоку нових ідей та талантів у компанію.

Kaizen і культура постійних покращень: Незважаючи на разові стрибки вдосконалення під час великих проектів, основою довгострокового успіху залишається здатність організації щодня трохи вдосконалюватись. Управління має впровадити механізми підтримки Kaizen: регулярні зустрічі команд для обговорення, що можна покращити; дошки або цифрові застосунки для збору ідей; швидке нагородження чи визнання авторів реалізованих пропозицій. Відомий принцип *«1% покращення щодня»* з часом дає величезний ефект. Для прикладу, якщо оператор знайшов спосіб зекономити 5 хвилин на зміні через зміни в алгоритмі звітування – за рік це обернеться десятками додаткових годин роботи обладнання. Маленькі кроки Kaizen підтримують і підсилюють великі інновації, забезпечуючи повну віддачу від нових технологій.

Методика TWI (Training Within Industry): В контексті управління людьми важливо довгостроково закріпити систему швидкого і якісного

навчання на робочому місці. Після завершення проекту модернізації варто офіційно впровадити TWI-програми для майстрів та наставників. Вони містять три ключові напрямки – інструктаж роботи (Job Instruction), методи роботи (Job Methods) та робота з людьми (Job Relations). Це допоможе стандартувати процес передачі знань новим співробітникам, формувати навички аналізу і вдосконалення методів роботи на рівні лінійного персоналу та покращувати мікроклімат у колективах. По суті, TWI – це основа lean-культури: воно народилось під час Другої світової для швидкого навчання робітників і стало фундаментом післявоєнної японської системи управління. Для «Каметсталі» адаптована TWI стане в пригоді не лише на МБЛЗ, а й у всіх цехах, особливо в умовах, коли приплив молодих кадрів обмежений і треба рости майстрів зсередини. Так ми забезпечимо спадкоємність знань і стабільно високий рівень майстерності персоналу.

У підсумку, поєднання цих підходів створює синергію: технічне вдосконалення підтримується гнучкими і ефективними методами управління. Комбінат перетворюється на організацію, що навчається (learning organization) – де кожен постійно підвищує кваліфікацію, процеси оптимізуються безперервно, а культура сприяє інноваціям. Це і є запорука довгострокової вигоди: технології можна придбати, а от побудувати сильну команду та культуру – це стратегічне завдання менеджменту.

Європейський досвід і порівняння

Для підтвердження життєздатності запропонованої моделі варто звернутись до досвіду провідних європейських металургійних підпри-

емств, які вже впровадили схожі технології та підходи. Зокрема, компанія Voestalpine (Австрія) неодноразово ставала прикладом успішної цифрової трансформації в сталеливарній галузі:

Voestalpine (Донавіц, Австрія) – у 2020 році на заводі в Донавіці запущено найсучаснішу машину безперервного лиття заготовок (CC4), яка замінила стару після 40 років служби. Цей комплекс повністю відповідає концепції «розумного заводу» (Industry 4.0): він дозволяє повністю автоматизувати процес випуску сталевих заготовок (блюмів) – від заливання до різання і подачі на склад. Завдяки повній цифровізації досягнуто підвищення якості продукції: система автоматичного контролю температури та електромагнітного перемішування забезпечує однорідність структури сталі, запобігаючи утворенню дефектів навіть при високих швидкостях розливки. Керівництво voestalpine відзначає, що нова МБЛЗ дозволила виробляти спеціальні марки сталі з гарантовано високою чистотою та точними властивостями під потреби автомобільної та залізничної промисловості. При цьому було підкреслено, що цифрові технології значно розширили можливості контролю якості в режимі реального часу – ключові параметри (чистота, однорідність) тепер коригуються автоматикою з високою точністю. Цей приклад підтверджує: інвестиція в сучасну МБЛЗ дає не лише збільшення обсягів, а й суттєвий приріст якості і можливість виходу на нові ринки з продукцією преміум-якості. Одночасно на підприємстві оптимізовано штат: нова лінія частково замінила кілька старих, і хоча створено нові високотехнологічні робочі місця, загальна чисельність виробничого персоналу скоротилася (за даними прес-релізу, запуск CC8 у Лінці дозволив замінити стару CC3 і створив 42 нових робочих місця при річній потуж-

ності 1,2 млн т). Це опосередковано свідчить про підвищення продуктивності та зміну профілю зайнятості – більша автоматизація, менше людей на тонну сталі.

Приклад: новітня машина безперервного лиття сталі (CC4) на заводі voestalpine у Донавіці. Повністю автоматизований комплекс відповідає стандартам Індустрії 4.0, забезпечуючи високу якість заготовок і мінімізуючи людський фактор.

Voestalpine (Лінц, Австрія) – ще раніше, у 2017 році, на головному заводі в Лінці компанія ввела в експлуатацію слябову МБЛЗ №8, інвестувавши понад €100 млн. Нова МБЛЗ (однониткова, як і планується на «Каметсталі») має продуктивність ~2,2 млн тонн слябів на рік і призначена для високоякісної тонколистової сталі. Вона частково взяла на себе навантаження інших машин і дозволила виготовляти спеціальні марки сталі (особливо для автомобілебудування) з бездоганною поверхнею. Цей проект цікавий тим, що впровадження нової технології супроводжувалося активними інвестиціями в персонал: voestalpine створила 42 нові робочі місця для роботи з МБЛЗ-8 і провела масштабне навчання кадрів. Тобто одночасно з будівництвом цеху компанія готувала людей – схожа паралельна стратегія, що рекомендована і для «Каметсталі». В результаті Лінц отримав підвищення якості продукції, а працівники – сучасні умови та впевненість у завтрашньому дні завдяки розвитку компетенцій.

ArcelorMittal та Thyssenkrupp (ЄС): Великі сталеливарні компанії Європи також цілеспрямовано цифровізують виробництво, впроваджуючи Industry 4.0. Наприклад, на комбінаті Thyssenkrupp Steel в Дуїсбурзі гарячий стан оснащений системами збору понад 1,2 млрд вимі-

рювань, великі дані та цифрові двійники стали повсякденною практикою. В компанії відзначають, що терміни як *Big Data*, *Machine Learning* вже так само знайомі металургам, як і традиційні поняття доменної плашки. Це призвело до того, що у штаті поряд з прокатниками тепер працюють фахівці з штучного інтелекту, аналітики даних, програмісти – тобто відбувається зсув структури зайнятості у бік високотехнологічних ролей. Thyssenkrupp повідомляє про суттєве підвищення точності дотримання параметрів продукції: тисячі датчиків по всьому ланцюгу контролю забезпечують настільки точне ведення процесу в режимі онлайн, що відхилення по товщині, міцності тощо мінімізовані. Ці досягнення стали можливими завдяки інтеграції підходів Lean (вимірювання та усунення варіабельності) з новітніми IT-рішеннями. В свою чергу, ArcelorMittal інвестує в проекти «розумних фабрик» – від автономних кранів до прогновної аналітики для доменних печей. Важливо, що в усіх випадках західні компанії підкреслюють роль культури і людей: навіть впроваджуючи автономні системи, вони паралельно працюють над культурою співпраці між IT та виробництвом та розвитком компетенцій. Це повністю відповідає нашій моделі Digital Leadership і навчання.

Металургійне обладнання нового покоління: Окремо варто згадати європейських постачальників технологій – SMS Group, Primetals, Danieli – які активно просувають цифрові рішення для сталеливарні. Наприклад, німецький SMS Group створив підрозділ SMS digital, залучивши понад 350 IT-спеціалістів, і впроваджує концепцію «навчаємого сталеплавильного заводу» (learning steel mill) спільно з американським заводом Big River Steel. Система на основі штучного інтелекту там аналізує дані з 50 000 датчиків і зовнішніх джерел, самонавчаючись оптимізувати процеси – від енергоспоживання до якості продукції. Danieli,

наш партнер, теж впроваджує елементи штучного інтелекту та предиктивної аналітики у свої Q-системи. Такий досвід показує шлях, куди ми можемо рухатись після успішного освоєння базових цифрових рішень: поступово переходити до предиктивного управління, коли система не тільки реагує, але й наперед пропонує коригування для запобігання проблем. Це і є цільовою моделлю «розумного» меткомбінату майбутнього – автономне виробництво під наглядом людини.

Підсумовуючи європейський досвід: більшість сучасних комбінатів, що впровадили цифрові МБЛЗ та інші Industry 4.0 рішення, досягли помітного прогресу в ефективності та якості. Вони також змогли адаптувати свою організацію – змінити структуру персоналу, культуру та підходи до управління – щоб отримати максимальну віддачу від технологій. «КАМЕТ-СТАЛЬ» має всі шанси повторити і перевершити ці досягнення, враховуючи уроки лідерів галузі. Наш шлях багато в чому унікальний через важкі умови (воєнний час, необхідність відновлення економіки), але водночас є можливість «стрибнути» одразу на кілька поколінь вперед, перейнявши найкраще від світових практик.

Висновки та очікувані вигоди

Впровадження нової двохструмкової слябової МБЛЗ №3 на «Каметсталі» – це не просто технічне оновлення, а комплексна трансформація бізнесу. Оновлена модель управління, описана в цій пропозиції, забезпечить максимальну реалізацію потенціалу нової технології і створить основу для сталого розвитку комбінату. Ключові результати, яких очікується досягти:

Підвищення продуктивності та ефективності: Завдяки автоматизації та оптимізації процесів комбінат зможе випускати більше сталі при менших затратах. Зросте виробіток на одного працівника, зменшаться

простої і втрати металу. Вже за перший рік після запуску очікується приріст річного випуску до проектних 2,2 млн тонн слябів, а собівартість виробництва одиниці продукції має знизитися (за рахунок економії на витратах праці, оптимізації технологічних параметрів і підвищення виходу придатного).

Вища якість і конкурентоспроможність продукції: Нова МБЛЗ дасть можливість виробляти широкий сортамент слябів високої якості – з кращою поверхнею, внутрішньою структурою, точною геометрією. Цифровий контроль забезпечить стабільність цих характеристик від плавки до плавки. Це відкриє для «Каметсталі» двері до вибагливих ринків (автомобільний, машинобудівний сектор ЄС) і дозволить конкурувати з провідними європейськими виробниками на рівних. Як зазначалося на прикладі voestalpine, інвестиція в якість через технології приносить додатковий прибуток шляхом виходу на нові ринки.

Безпека та екологічність: Автоматизація найбільш небезпечних операцій (робота біля розливного струменя, різання, переміщення гарячих слябів) значно знизить ризики виробничого травматизму. Роботизація і дистанційне керування процесами у зоні розливки підвищать рівень промислової безпеки до європейських стандартів. Крім того, більш точне управління технологією позитивно вплине на екологічні показники: стабільний процес – це мінімум аварійних ситуацій, зменшення викидів браку, економія енергії. У майбутньому інтеграція з екосистемою Industry 4.0 дозволить ефективніше контролювати й знижувати вуглецевий слід виробництва (наприклад, оптимізуючи енергоспоживання кожної тонни сталі на основі даних, як це робить стартап Smart Steel Technologies у співпраці зі світовими меткомбінатами).

Гнучкість виробництва та стійкість до змін: З оновленою управлінською моделлю «КАМЕТ-СТАЛЬ» стане організацією, здатною швидко перебудовуватися. Ми матимемо гнучкі команди і проактивну культуру, що допоможе реагувати на будь-які зовнішні виклики – чи то коливання попиту, чи логістичні проблеми, чи нові регуляторні вимоги. Ця внутрішня агільність особливо цінна в часи невизначеності. Комбінат зможе планувати виробництво практично «під замовлення», оптимально використовуючи ресурси і підтримуючи здоровий запас міцності.

Розвиток людського капіталу: Хоч частина персоналу і скоротиться, та загалом підприємство отримає більш кваліфікований, мотивований колектив. Інвестиції в навчання принесуть плоди у вигляді універсальних працівників, здатних вирішувати комплексні завдання. Виросте нове покоління майстрів і інженерів – цифрово грамотних, відкритих до інновацій. Це створює базу для подальших модернізацій та впровадження нових технологій, адже люди стануть рушійною силою змін. Впровадження принципів TWI та культури постійного вдосконалення закладе основу для самонавчання організації, коли покращення відбуватимуться ініціативно на всіх рівнях і не згаснуть після завершення проекту.

Економічна ефективність і рентабельність: У підсумку всі зазначені вигоди конвертуються у фінансові показники. За рахунок оптимізації витрат на персонал, підвищення продуктивності та виходу на нові ринки, комбінат очікує зростання рентабельності виробництва. Рекордні інвестиції, зроблені у 2025 році, окупляться підвищенням прибутку і зміцненням позицій «Каметсталі» в групі «МЕТІНВЕСТ». Згідно прес-релізів, навіть відновлення присутності на ринку певних видів продукції

вже здатне принести додатковий прибуток підприємству. А вихід з слябами високої якості на ринок ЄС може стати новим джерелом валютної виручки.

На завершення, варто наголосити: запропонована модель – не статичний документ, а живий план дій, який треба буде коригувати й уточнювати в ході реалізації проекту. Гнучкість та адаптивність – її вбудовані властивості. Завдання менеджменту «Каметсталі» – взяти цю основу і наповнити її конкретним змістом, враховуючи реалії підприємства. За підтримки акціонерів, технологічних партнерів (Danieli) та спираючись на найкращі практики, комбінат має всі шанси здійснити стрибок у майбутнє – стати сучасним, ефективним і стабільно прибутковим виробництвом, що стане гордістю української промисловості. Це інвестиція не лише в обладнання, а й в людей, в культуру і в довгострокову конкурентоспроможність підприємства.

На рисунку 3.1 зображено поетапне виконання завдань у період із вересня 2026 року по липень 2028 року на діаграмі Ганта

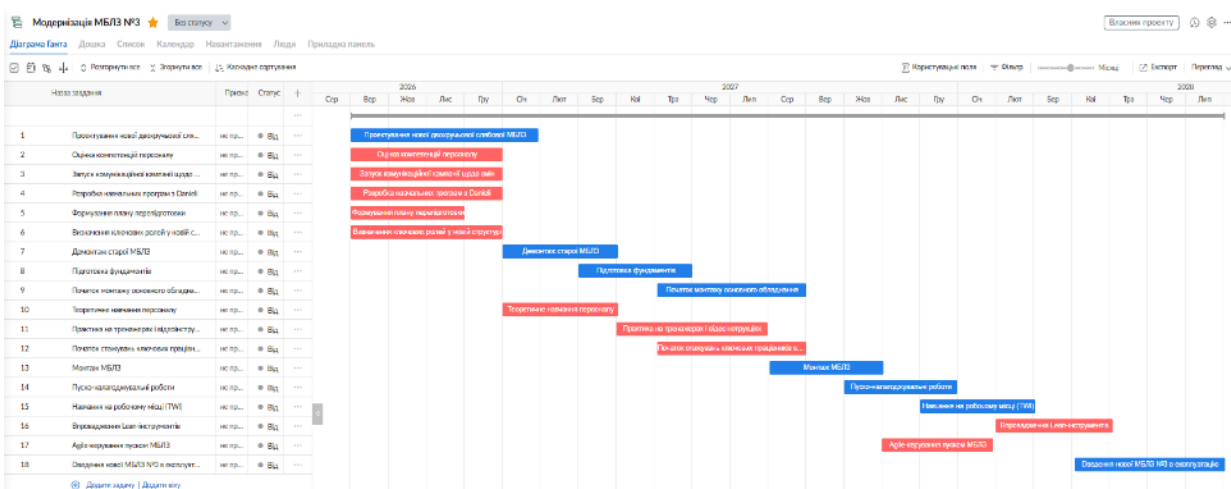


Рисунок 3.1 Діаграма Ганта

Основні етапи проєкту модернізації МБЛЗ №3:

1. Підготовчий етап (вересень 2026 – грудень 2026): Проєктування нової двохручової слябової МБЛЗ Оцінка компетенцій персоналу Запуск комунікаційної кампанії щодо змін Розробка навчальних програм з Danieli Формування плану перепідготовки Визначення ключових ролей у новій структурі

2. Демонтажно-будівельний етап (січень 2027 – червень 2027): Демонтаж старої МБЛЗ Підготовка фундаментів Початок монтажу основного обладнання

3. Навчально-практичний етап (лютий 2027 – вересень 2027): Теоретичне навчання персоналу Практика на тренажерах і відпрацювання Початок стажувань ключових працівників

4. Монтажно-пусковий етап (липень 2027 – квітень 2028): Монтаж МБЛЗ Пуско-налагоджувальні роботи Навчання на робочому місці (TWI) Agile-керування пуском МБЛЗ Впровадження Lean-інструментів

5. Фінальний етап (травень 2028 – липень 2028): Введення нової МБЛЗ №3 в експлуатацію

Кольорове позначення та підсумок

Синій – технічні та будівельно-монтажні завдання

Червоний – організаційно-управлінські та навчальні завдання Підсумок тривалості проєкту:

Початок: вересень 2026 Завершення: липень 2028 Загальна тривалість: 1 рік і 11 місяців (23 місяці).

4. СКЛАД ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ДВОХСТРУМКОВОЇ МБЛЗ НА «КАМЕТСТАЛІ»

Запропонована модель МБЛЗ передбачає встановлення сучасної двохструмкової машини лиття слябів (широких заготовок) із високим ступенем автоматизації, цифровим контролем процесів і повною інтеграцією в існуючу інфраструктуру комбінату. Така конструкція дозволяє досягнути гнучкості виробництва, розширити сортамент і підвищити якість продукції. На рисунку 4.1 зображено склад обладнання МБЛЗ.

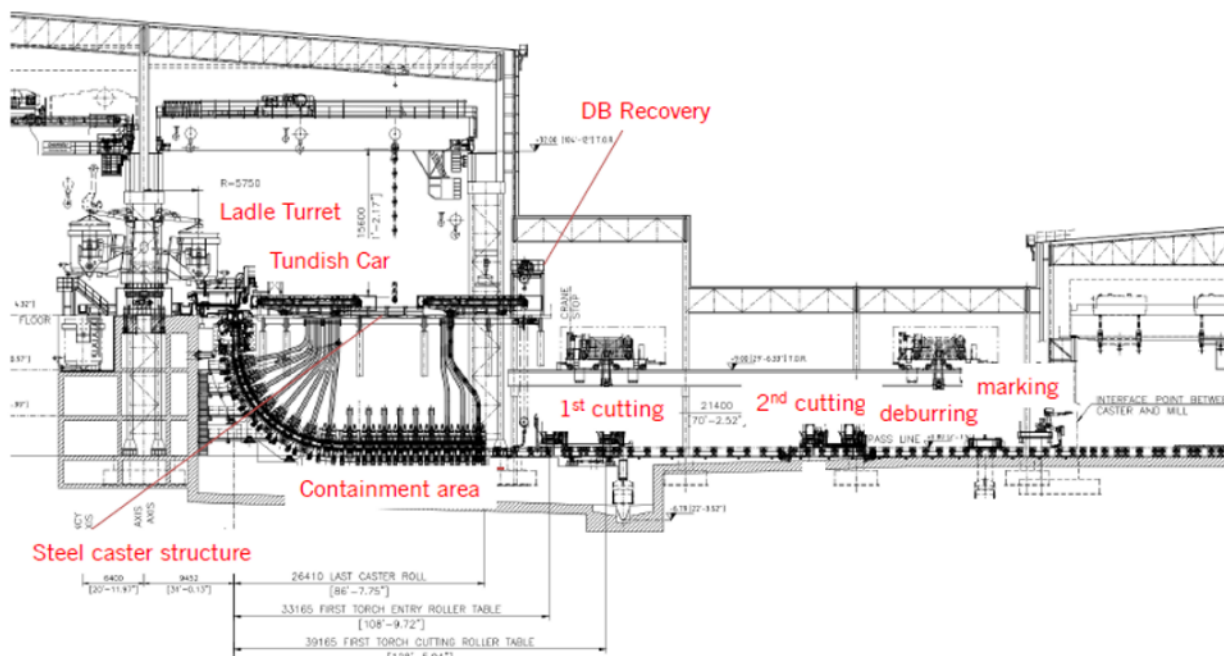


Рисунок 4.1 склад обладнання МБЛЗ

4.1 Склад обладнання

1. ЗОНА РОЗЛИВУ

Підйомно-поворотний стенд

Детектор шлаку + маніпулятор захисної труби

Проміжний ківш + продувка аргоном

Стопорний механізм

Візок проміжного ковша

Пристрій заміни стакана / очищення SEN (підводної труби)

Установка для затравки, підготовки, відновлення

2. ЗОНА КРИСТАЛІЗАТОРА ТА МЕХАНІЗМ КАЧАННЯ (MOULD AND OSCILLATOR AREA).

Кристалізатор + мідні плити

Контроль рівня металу в кристалізаторі + система Q-Level

Привід подачі порошку (для змащування)

Звуження MBA / конусність (форма кристалізатора)

Q-Mod (механізм качання)

Q-Mar + ULD – датчики для вимірювання динаміки

Електромагнітне перемішування (EMB) / MULTIMODE / IN-ROLL

Механізм качання

3. СЕКЦІЙНА ЗОНА (SEGMENTS AREA)

Секції

Опорна структура секцій + напрямні для витягування

Перевірка зазорів між валками

Система розпилення, м'яке обтиснення (Soft Reduction) – Q-Cool, Q-Core

Q-Pulse – електромагнітне перемішування

4. ЗОНА ВИВАНТАЖЕННЯ (DISCHARGE AREA)

Маятникові ножиці

Машина газокисневої різки + роликовий стіл

Машина для очищення після різки

Тепловий сканер / вимірювач ширини

Контроль поверхні + система Q-Art

Маркирувальна машина.

На рисунку 4.2 схематично зображено повний склад обладнання машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Continuous Casting Machine and Process

1. CASTER HEAD ZONE

1. Ladle Turret
2. Slag detector + Shroud Manipulator
3. Tundish + Argon flooding
4. Stopper rod device
5. Tundish Car
6. SEN exchange device
7. Dummy Bar insertion / preparation / recover

2. MOULD AND OSCILLATOR AREA

1. Mould + Copper plates
2. Mould level + Q-Level
3. Powder feeding (video)
4. MWA / Taper gauge
5. Q-Mod (oscillator)
6. Q-Map + ULD Dysencaster
7. Stirrer EMB / MULTIMODE / IN-ROLL
8. Oscillator

3. SEGMENTS AREA

1. Segments
2. Segm. Supporting structure + Extraction guides
3. Roll Gap Checker
4. Spray map and Soft reduction (Quality) (Q-Cool, Q-Core)
5. Q-Pulse

4. DISCHARGE AREA

1. Pendulum Shear
2. Torch Cutting machine + roller table
3. Deburring machine
4. Thermal scanner / Width gauge...
5. Surface inspection + Q-Art...

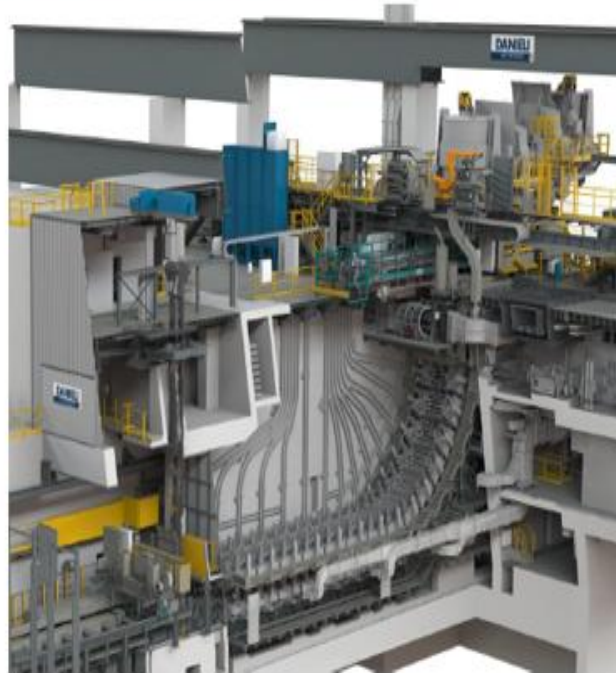


Рисунок 4.2 схема складу обладнання

4.2 Зона ролзиви CASTER HEAD ZONE

На рисунку 4.3 зображено приклад розливальних просторів між ківшом, проміжним ківшом і кристалізатором.

LADLE TURRET



Example of Casting Head Spaces Between: Ladle –Tundish – Tundish Cover - Mould

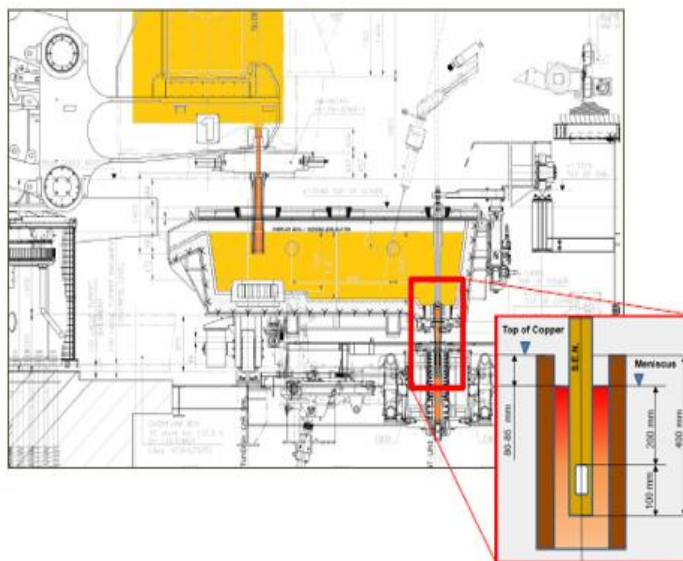


Рисунок 4.3. Приклад розливальних просторів (загальний вигляд)

1. Сталевий ківш - містить розплавлену сталь, яка подається вниз через донний отвір.

2. Поворотна вежа (ladle turret) - механізм, який повертає ківш до робочого положення над проміжним ковшем.

3. Захисні платформи, огороження, доступ для обслуговування - елементи безпеки та огляду.

4. Візуалізація злиття сталі з-під ковша - помітно світіння металу, що виходить із сопла ковша до проміжного ковша.

На рисунку 4.4 зображено підйомно-поворотний стенд.

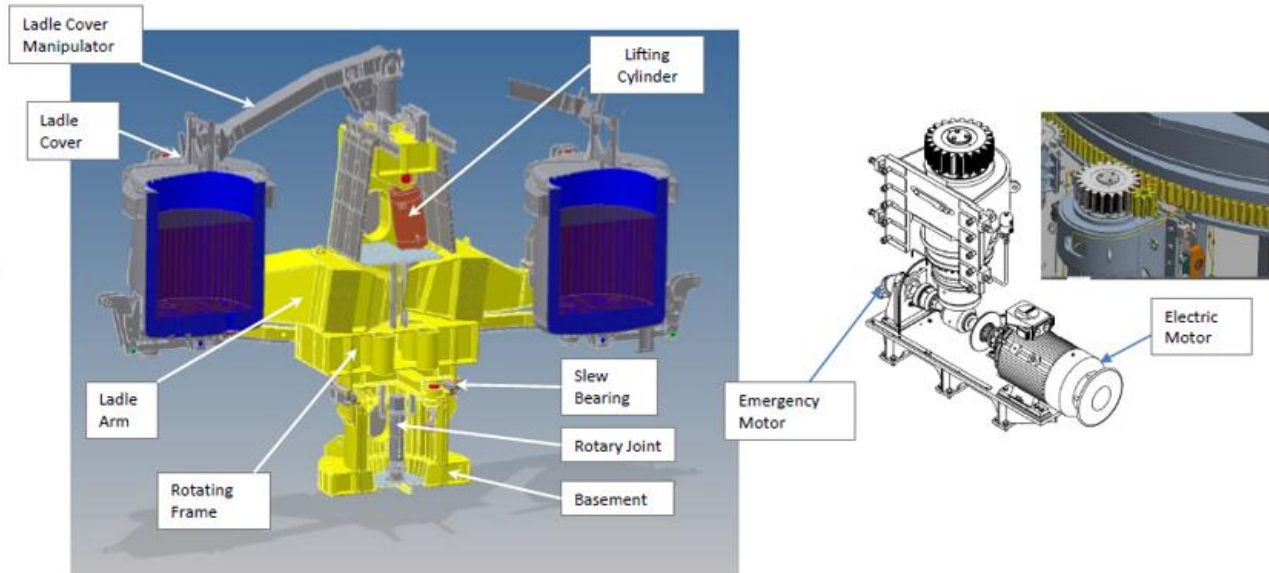


Рисунок 4.4. Підйомно-поворотний стенд (переріз за лінією розливи)

1. Rotating Frame – Обертова рама

Центральна конструкція, на якій кріпляться ковшові руки; забезпечує поворот усієї системи навколо вертикальної осі для зміни положення ковшів.

2. Ladle Arm – Ковшова рука

Механічний важіль, який утримує сталеплавильний ківш та дозволяє точно його позиціонувати над проміжним ковшем.

3. Ladle Cover – Кришка ковша

Теплозахисна кришка, яка накриває ківш для зменшення тепловтрат і запобігання вторинному окисненню сталі.

4. Ladle Cover Manipulator – Маніпулятор кришки ковша

Пристрій для автоматичного підняття/опускання кришки ковша перед початком розливу або після його завершення.

5. Lifting Cylinder – Підйомний циліндр

Гідравлічний або пневматичний механізм, який забезпечує вертикальне переміщення ковша для його точного встановлення на позицію розливу.

6. Slew Bearing – Поворотний підшипник

Високонантажений підшипник, який дозволяє плавно обертати всю башту разом із ковшами.

7. Rotary Joint – Обертове з'єднання

Забезпечує подачу робочої рідини або газу до рухомих частин (наприклад, до гідравліки), зберігаючи герметичність під час обертання.

8. Basement – Основа (фундамент)

Масивна базова частина конструкції, яка забезпечує стійкість та надійне кріплення всього стенда до підлоги машинного залу.

9. Electric Motor – Електродвигун

Основний привід, що забезпечує обертання башти в робочому режимі з високою точністю позиціонування.

10. Emergency Motor – Аварійний двигун

Резервний привід, який дозволяє повернути або перемістити ковш у безпечну позицію в разі відмови основного електродвигуна.

На рисунку 4.5 зображено систему виявлення шлаку з ковша.

Ladle Slag Detection

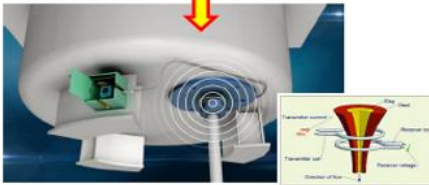
To detect slag at the end of the ladle and avoid drainage of slag in tundish

(1) System detecting vibration on manipulator

Easy installation

(2) Electromagnetic on ladle

Mounted in the slide gate (ladle)
detects variation of magnetic field when slag starts passing in place of steel
Requires multiple installation in different ladle



(3) Electromagnetic on manipulator

Mounted on manipulator and protruding to SEN
Easy installation
Delicate

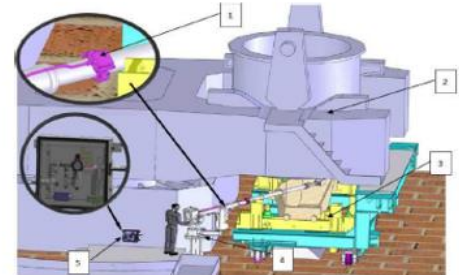
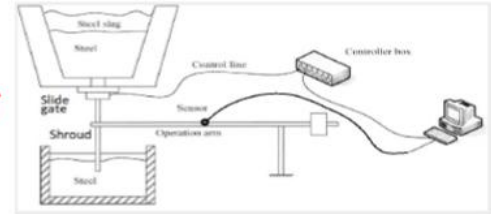
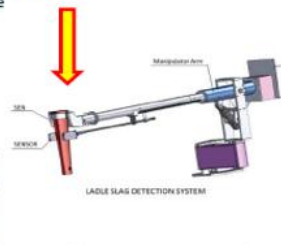


Рисунок 4.5 Система виявлення шлаку

1. System detecting vibration on manipulator – Система виявлення вібрацій на маніпуляторі

Принцип: Фіксує характерну зміну вібрації SEN/маніпулятора при зміні густини потоку (від сталі до шлаку).

Переваги: Проста установка, не потребує втручання в ківш.

Застосування: Безконтактна оцінка зміни потоку через SEN.

2. Electromagnetic on ladle – Електромагнітний датчик на ковші

Місце встановлення: Усередині ковшового шибера (slide gate).

Принцип: Вимірює зміну магнітного поля при переході від сталі до шлаку.

Особливості: Потребує індивідуального встановлення на кожен ківш, але забезпечує точне визначення моменту переходу.

3. Electromagnetic on manipulator – Електромагнітний датчик на маніпуляторі

Місце встановлення: На кінці SEN-маніпулятора (руки).

Принцип: Датчик вловлює зміну електромагнітного сигналу, що виникає при зміні середовища.

Переваги: Простий монтаж, сумісність з різними ковшами.

Недолік: Вразливий до механічних пошкоджень, делікатне виконання.

На рисунку 4.6 зображено маніпулятор захисної труби ковша.

Ladle Shroud Manipulator

The main Ladle Shroud Manipulator functions are the following:

- Support and rotate the Ladle Shroud and allow the operator to easily position or remove it on the ladle slide gate nozzle in the narrow space between the ladle and the tundish.
- Keep the Ladle Shroud in position and with a predefined contact pressure against the ladle slide gate nozzle for all casting time, in any situation (safety condition)
- Feed the head of the shroud with an Argon line to provide a good sealing between the shroud and the slide gate nozzle to prevent steel oxidation

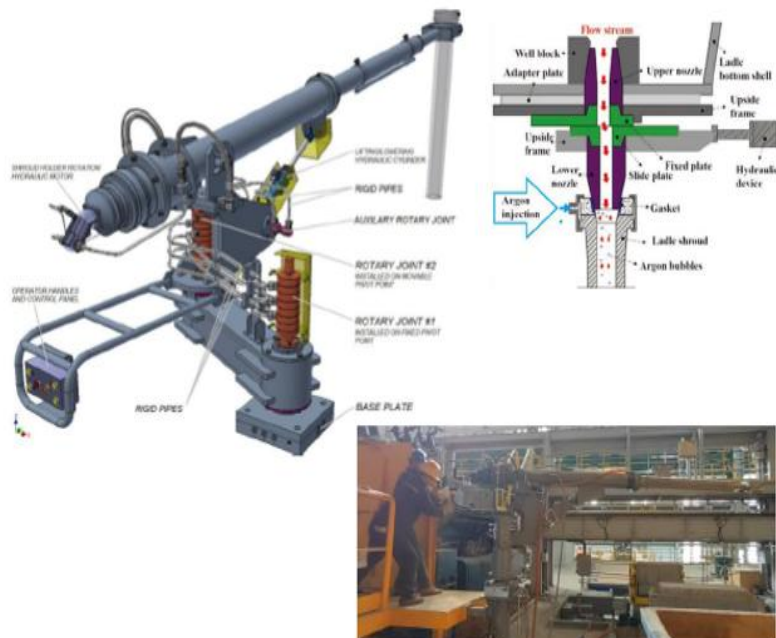


Рисунок 4.6 Маніпулятор захисної труби

1. Lifting Device – Підіймальний пристрій

Відповідає за вертикальне переміщення захисної труби ковша (shroud), дозволяючи точно встановлювати її на шибер ковша або піднімати після завершення розливу.

2. Rigid Pipes – Жорсткі трубопроводи

Трубна система, через яку подається аргон у головку труби. Забезпечує стабільний і захищений газовий потік для створення герметичного бар'єру між ковшем і SEN.

3. Rotary Joint #1 / #2 – Обертові з'єднання

Кінематичні вузли, що забезпечують обертання маніпулятора у горизонтальній і вертикальній площинах, дозволяючи гнучко позиціонувати трубу без деформацій трубопроводів.

4. Base Plate – Основна плита

Несучий елемент, який фіксує всю конструкцію маніпулятора на платформі або підлозі обслуговування. Забезпечує механічну стійкість і точну установку.

5. Auxiliary Rotary Joint – Додатковий поворотний вузол

Дозволяє тонке регулювання положення труби без зміщення основної конструкції. Забезпечує точне прилягання труби до шибера навіть при мікрозміщеннях.

На рисунку 4.7 зображено проміжний ківш.

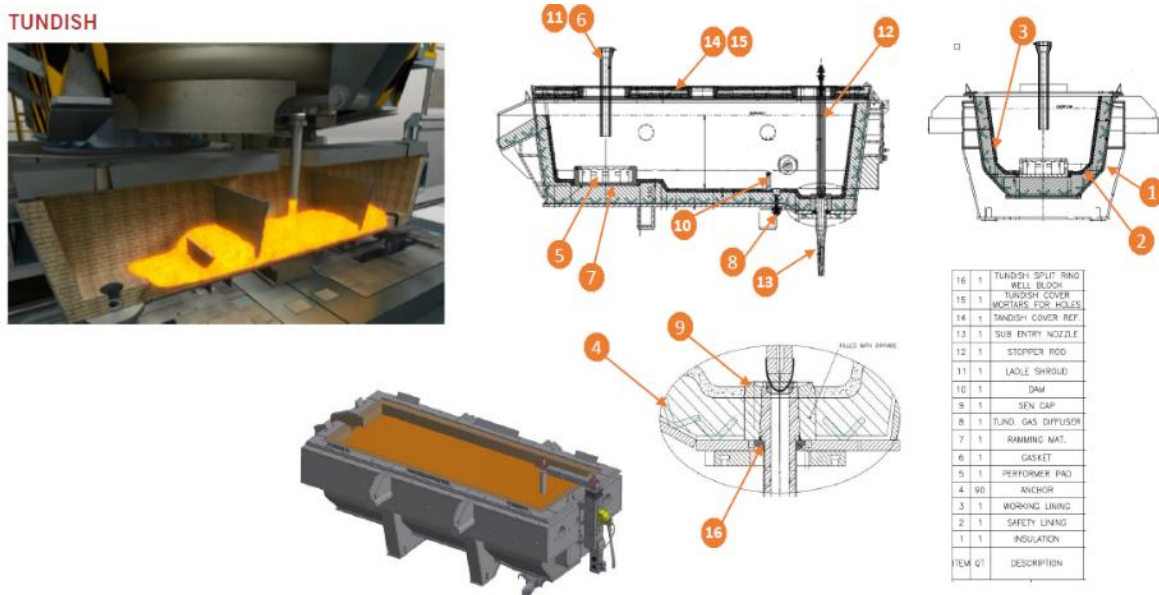


Рисунок 4.7 – Проміжний ківш

1. Well Block – Блок отвору

Вогнетривкий елемент у дні ковша, в якому закріплюється підводна труба (SEN).

2. Tundish Cover – Кришка проміжного ковша

Металева кришка, що зменшує тепловтрати, захищає від окиснення та механічних впливів.

3. Mortars for Holes – Отвори для шиберів

Отвори в футеровці для встановлення SEN, стопорного механізму або газових систем.

4. Tundish Cover Ref. – Посадкове місце кришки

Контур або опора для правильної фіксації кришки ковша.

5. Sub Entry Nozzle (SEN) – Підводна труба

Направляє рідку сталь з ковша в кристалізатор, захищає від окиснення.

6. Stopper Rod – Стопорний стержень

Регулює витрату сталі з ковша через SEN, використовується з пневматичним або гідравлічним приводом.

7. Ladle Shroud – Захисна труба ковша

З'єднує ківш і проміжний ківш у герметичному середовищі; захищає струмінь від окиснення.

8. Dam – Перегородка (дамба)

Розділяє внутрішній об'єм ковша для покращення розподілу потоку та утримання шлаку.

9. SEN Cap – Кришка підводної труби

Теплоізоляційний елемент для збереження температури перед початком розливу.

10. Tundish Gas Diffuser – Газовий дифузор

Подає інертний газ (аргон) для фільтрації й очищення сталі від включень.

11. Ramming Mass – Маса для заповнення зазорів

Засипка для ущільнення проміжків між вогнетривами внизу ковша.

12. Gasket – Ущільнення

Теплостійкий ущільнюючий матеріал для забезпечення герметичності.

13. Preformer Pad – Ущільнююча подушка

Елемент компенсації теплових деформацій.

14. Anchor – Якір

Металева арматура для закріплення футеровки.

15. Working Lining – Робоча футеровка

Основний вогнетривкий шар, що безпосередньо контактує зі сталлю.

16. Safety Lining – Захисна футеровка

Другий вогнетривкий шар, який ізолює корпус від тепла та служить у разі зносу робочої футеровки.

На рисунку 4.8 зображено аргонування проміжного ковша.

1. Optimised Configuration – Оптимізована конфігурація ковша

Геометрія ковша з вертикальним встановленням труби (LD Shroud), яка забезпечує ефективний контроль потоку.

2. Residence Time [s] – Час перебування сталі в ковші

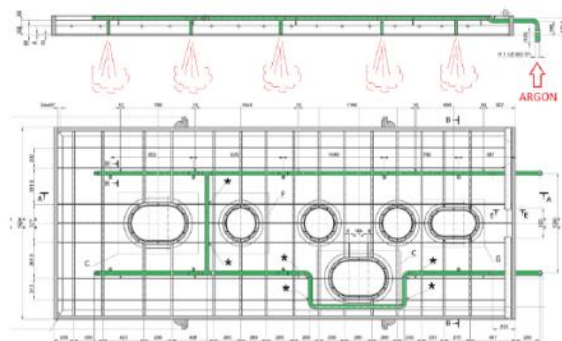
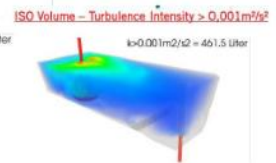
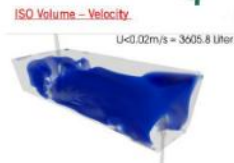
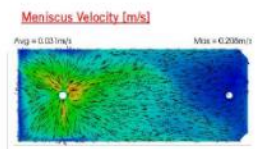
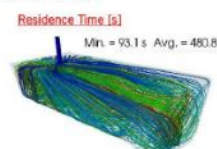
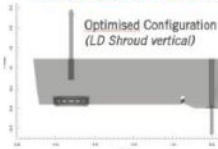
Мінімум: 93,1 с

Середній: 480,8 с

Забезпечує час для осідання неметалевих включень.

Argon FLOODING:

To prevent the oxidation of the liquid steel, before open the slide gate of the ladle, the tundish is flushed with argon to reduce the amount of oxygen in the tundish. After reaching a certain level of steel in the tundish the protection powder will be added, and the argon flow can stop.

**TUNDISH DESIGN – GENERAL - CFD ANALYSIS**

- The configuration guarantees:
- a good minimum and average RT: useful to improve the inclusion floatation
 - a proper meniscus velocity with very regular pathlines
 - a satisfying volume of low velocity that promotes the inclusion floatation and reduces turbulent intensity



Рисунок 4.8. Аргонування проміжного ковша

3. Meniscus Velocity [м/с] – Швидкість на поверхні

Середнє значення: 0,03 м/с

Макс.: 0,208 м/с Поверхнева швидкість контролюється для уникнення турбулентності й окиснення.

4. ISO Volume – Velocity (U < 0.02 м/с)

Об'єм рідини з низькою швидкістю: 3605,8 л Зона плавного потоку для якісної фільтрації домішок.

5. ISO Volume – Turbulence Intensity > 0,001 м²/с²

Об'єм турбулентних зон: 461,5 л Локалізація зон підвищеної турбулентності для оптимізації форми ковша.

На рисунку 4.9 зображено Стопорний механізм (стержень)

STOPPER ROD

The mechanism consists of a vertical steel column that slides inside its guiding system. The column holds an arm that supports the stopper rod made of refractory material (monolithic type).

The position and level of the refractory rod can be adjusted to fit precisely the discharging nozzle.

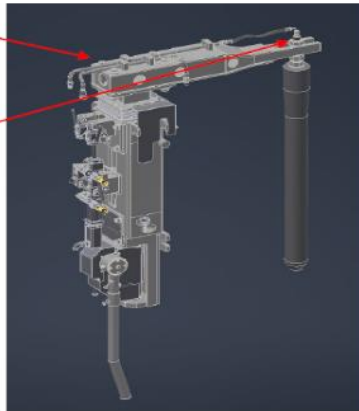


Рис. 4.9 Стопорний механізм

1. Vertical Steel Column – Вертикальна сталева колона

Несучий елемент конструкції, який переміщується вгору-вниз всередині напрямної системи. Забезпечує вертикальне позиціонування стопорного стержня.

2. Guiding System – Напрямна система

Механічні або гідравлічні напрямні, в яких рухається колона. Забезпечують стабільність та точність переміщення по осі.

3. Support Arm – Опорний важіль

Горизонтальний важіль, закріплений на колоні, який утримує сам вогнетривкий стержень у правильному положенні над отвором SEN.

4. Stopper Rod – Стопорний стержень

Основний регулюючий елемент, виготовлений з монолітного вогнетривкого матеріалу. Опускається в отвір підводної труби та перекриває потік рідкої сталі.

5. Lifting/Driving Mechanism – Підйомний або приводний механізм

Гідравлічний або електромеханічний привід, який забезпечує переміщення всієї конструкції вгору/вниз згідно з командами системи управління.

6. Position Adjustment Unit – Механізм регулювання положення

Система тонкого налаштування (часто з датчиками), що дає змогу точно виставити рівень занурення стержня в отвір для досягнення необхідної витрати сталі.

7. Mounting Bracket / Frame – Кріпильна рама або плита

Основа, яка закріплює весь вузол стопорного стержня до корпусу машини або проміжного ковша, забезпечуючи жорсткість і безпечну експлуатацію.

На рисунку 4.10 зображено візок проміжного ковша.

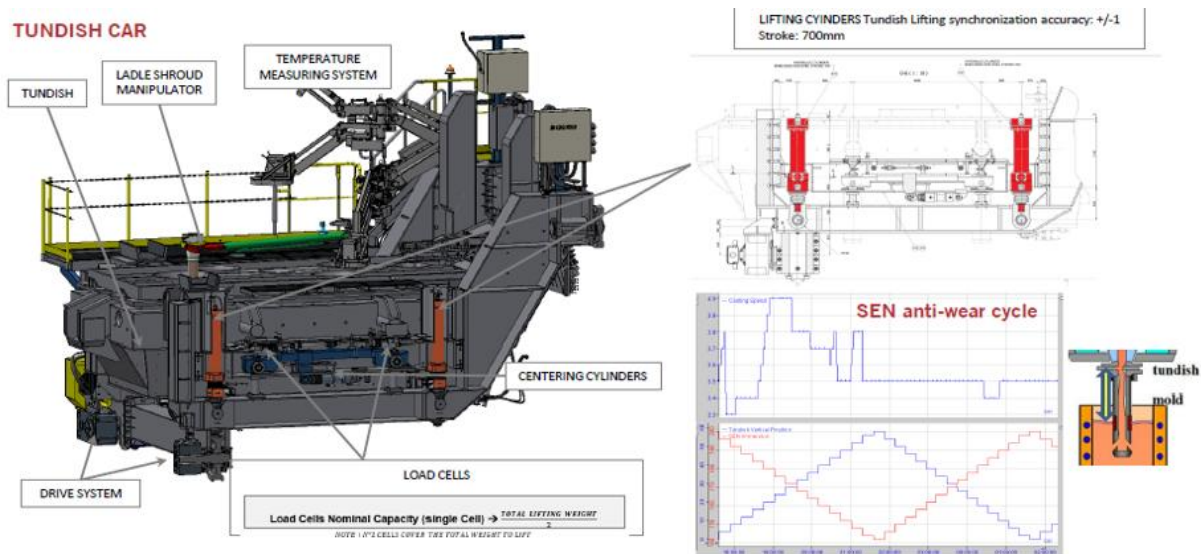


Рисунок 4.10 – Візок проміжного ковша

1. Tundish – Проміжний ківш

Встановлюється на візок і є резервуаром для тимчасового зберігання сталі під час розливу. Подає сталь до кристалізатора через SEN.

2. Ladle Shroud Manipulator – Маніпулятор захисної труби ковша

Обслуговує зону розливу між сталевим ковшем і проміжним ковшем, забезпечуючи герметичне з'єднання труби й запобігаючи окисненню.

3. Temperature Measuring System – Система вимірювання температури

Автоматизована система з термопарою або іншим сенсором, що дозволяє вимірювати температуру сталі безпосередньо в ковші.

4. Centering Cylinders – Центрувальні циліндри

Гідравлічні циліндри, що точно позиціонують ківш по горизонталі відносно центру кристалізатора, запобігаючи зміщенню SEN.

5. Load Cells – Вагові датчики (тензодатчики)

Контролюють масу ковша зі сталлю. Дають змогу точно визначити рівень заповнення ковша, необхідний для автоматизації розливу.

6. Drive System – Приводна система

Забезпечує рух візка по рейкових шляхах. Може бути електромеханічною або гідравлічною, із системою позиціонування.

7. Lifting Cylinders – Підіймальні циліндри

Піднімають/опускають проміжний ківш. Синхронізація підйому: ± 1 мм, хід: 700 мм. Це важливо для запобігання зсуву SEN у кристалізаторі.

На рисунку 4.11 зображено пристрій заміни підводної труби (SEN Change Device).

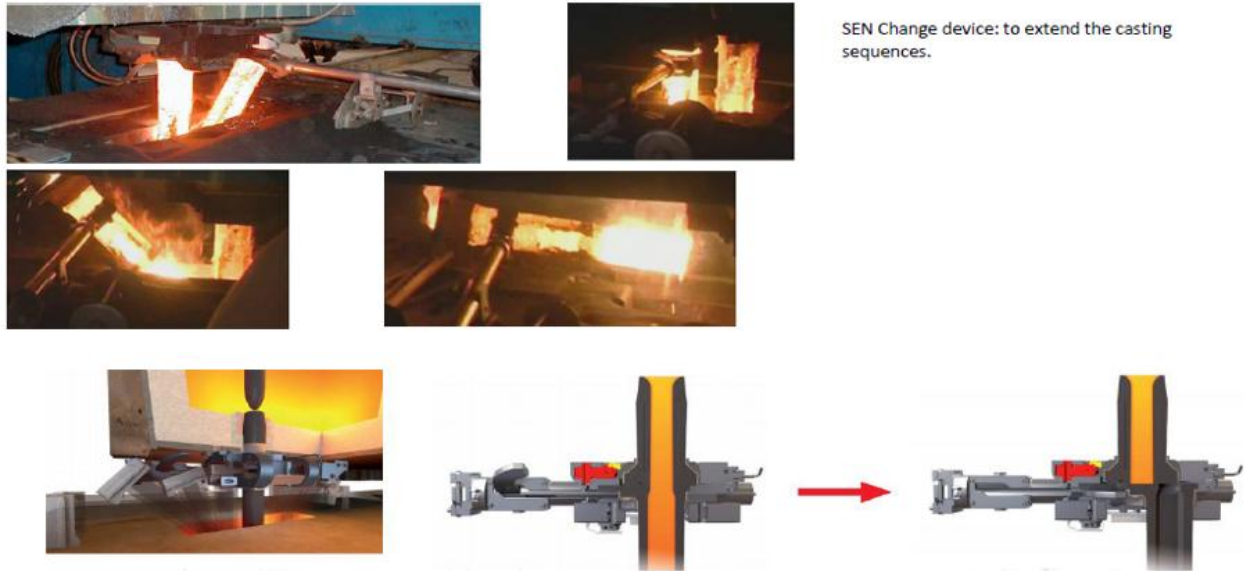


Рисунок 4.11. Пристрій заміни підводної труби (SEN Change Device)

1. Обертювий маніпулятор (Rotating Manipulator Arm)
Механічна або гідравлічна рука, яка фіксує й переміщує SEN. Забезпечує точне позиціонування нової труби під час заміни.
2. Затискний механізм (Clamping System)
Фіксує стару та нову SEN під час демонтажу/установки. Забезпечує герметичне та стійке з'єднання з well block.
3. Підйомно-подаючий механізм (Lifting & Feeding Device)
Опускає нову SEN у розливний отвір та піднімає стару. Може бути гідравлічним або механічним.
4. Напрямна система (Guiding System)
Забезпечує точну траєкторію переміщення SEN при встановленні, з урахуванням осьового центрування над кристалізатором.
5. Захисний екран / щит (Protection Shield)

Металевий або вогнетривкий елемент для захисту оператора та механізмів від бризок рідкої сталі під час заміни.

6. Аргонова система (Argon Line Connection)

Забезпечує подачу аргону до зони стику SEN з well block, щоб запобігти окисненню при заміні.

7. Блок керування (Control Unit)

Програмно-керована система (PLC або HMI), що виконує операції заміни автоматично або з пульта оператора з високою точністю.

8. Сенсори положення (Position Sensors)

Контролюють точність встановлення SEN у well block та стан фіксації. Можуть включати індикатори тиску, осі, контакту.

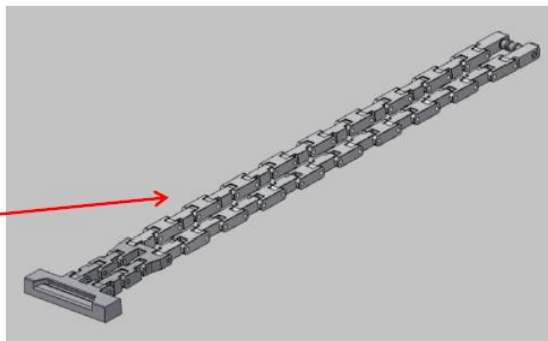
На рисунку 4.12 зображено затравку (Dummy Bar).

Dummy BAR:

Inserted inside the mould is the solid base to start the steel solidifying process, then drag the head of the slab till the exit of the segments.

There are 2 main design:

- With LINKS, for **CONVENTIONAL** slab caster
- With flexible plate inside, for **THIN** slab caster



It has to be flexible, to follow the segment design, but strong, to allow to be drag by the pinch rolls (at least 3 pinch rolls holding it during head preparation, for safety).

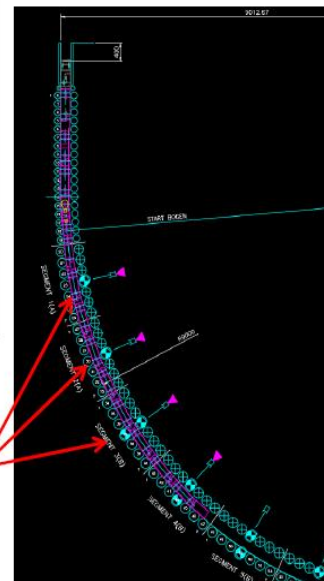


Рисунок 4.12. Затравка (Dummy Bar)

1. Head Piece – Головна частина (балка)

Форма відповідає перерізу сляба (наприклад, 220×1200 мм). Входить у кристалізатор, і на неї спирається шар застиглої сталі при старті розливу.

2. Chain Links – Ланцюгове з'єднання

Секції пускової балки з'єднані шарнірами (типу "панцирного ланцюга"), що забезпечує гнучкість у радіусі сегментів машини.

3. Flexible Plate (для тонких слябів)

Альтернативна конструкція з внутрішньою гнучкою пластиною — застосовується у тонкострічкових машинах безперервного лиття (thin slab caster).

4. Supporting Rollers Contact Points – Контактні точки з роликами

Пускова балка повинна утримуватись щонайменше трьома прижимними роликами (pinch rolls) для безпечного захоплення й витягування — це зображено на схемі праворуч.

На рисунку 4.13 зображено завантаження пускової затравки згори (Dummy Bar Insertion – TOP FEEDING).

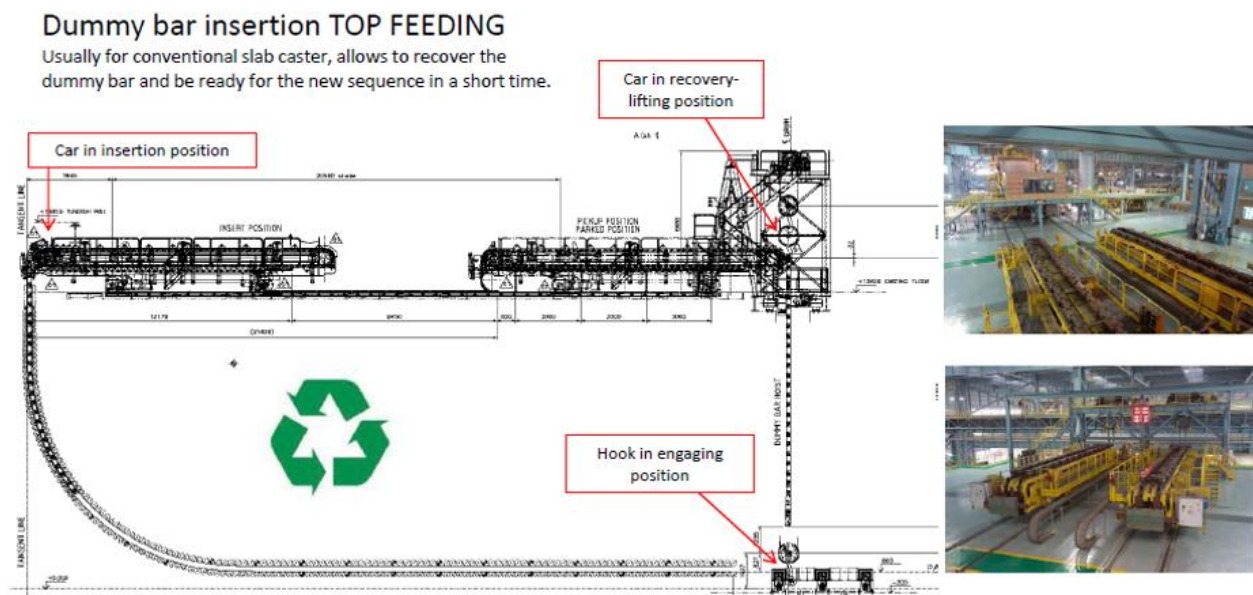


Рисунок 4.13. Схема завантаження затравки згори

1. Car in insertion position – Візок у позиції введення

Візок розміщується біля кристалізатора та подає пускову балку в зону розливу. Це початкова точка процесу.

2. Car in recovery-lifting position – Візок у позиції підйому / відновлення

Після завершення розливу, пускова балка витягується з машини й переноситься у зону зберігання або повторного використання.

3. Hook in engaging position – Гак у позиції зачеплення

Механічний гак або захватний пристрій з'єднується з головкою пускової балки для її подачі чи витягування.

На рисунку 4.14 зображено подавання затравки знизу (Dummy Bar Bottom Feeding).

Dummy bar insertion BOTTOM FEEDING

The parking position, after recovery the DB is off-line above the evacuation.

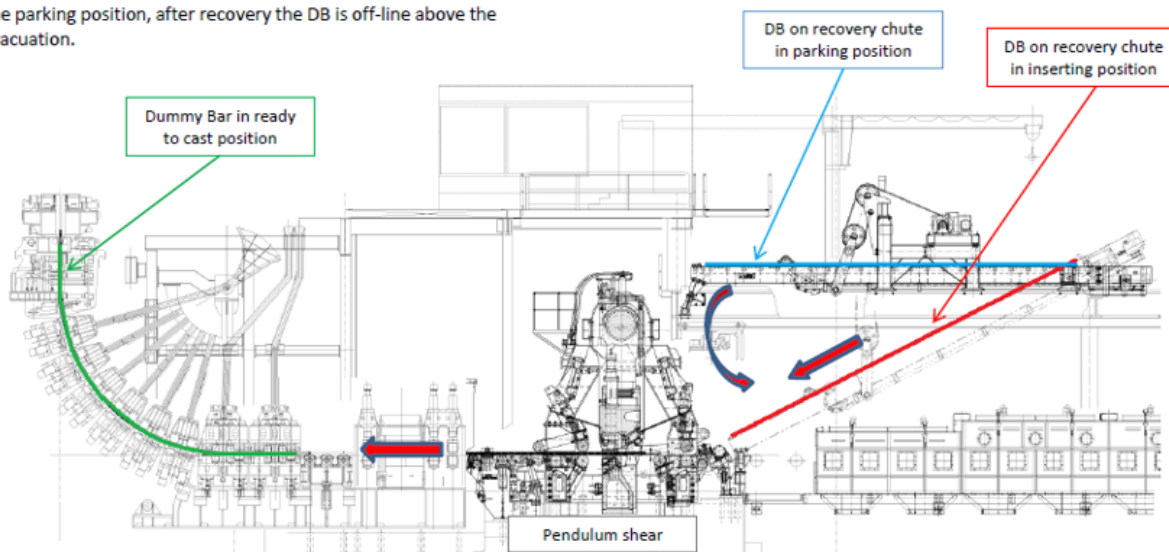


Рисунок 4.14. Схема завантаження затравки знизу

1. Dummy Bar (Пускова балка)

Гнучка сталева конструкція, що вводиться в дугу МБЛЗ перед початком розливу, приймає першу частину затверділої сталі.

2. Recovery Chute (Жолоб для подачі/повернення балки)

Похила направляюча система, по якій пускова балка автоматично:

- подається вниз у зону введення (inserting position),
- повертається вверх після розливу (parking position).

3. Parking Position Platform (Платформа паркування балки)

Верхня частина жолоба, де балка зберігається після використання, поза зоною транспортування сляба

4. Inserting Position Zone (Зона введення)

Нижній кінець жолоба, куди балка опускається для входу у сегменти — вихідна точка перед початком розливу.

5. Arc Segment Zone (Сегментна дуга)

Робоча зона машини безперервного лиття, куди встановлюється балка для приймання рідкої сталі. Показано як вигнута частина з великою кількістю роликів.

6. Pendulum Shear (Маятникові ножиці)

Різальний механізм, розташований між зоною введення балки та виходом сляба. Використовується для первинного різання.

7. Evacuation Roller Table (Роликовий транспортер евакуації)

Конвеєрна система для видалення литого сляба після розливу. Пускова балка не перешкоджає роботі транспортера, бо зберігається вище нього.

4.3 Зона кристалізатора та механізм качання (MOULD AND OSCILLATOR AREA).

На рисунку 4.15 зображено кристалізатор (MOULD) і механізм качання (OSCILLATOR), загальний 3D-вид (зліва).

Рисунок 4.15. Кристалізатор (MOULD) і механізм качання (OSCILLATOR).

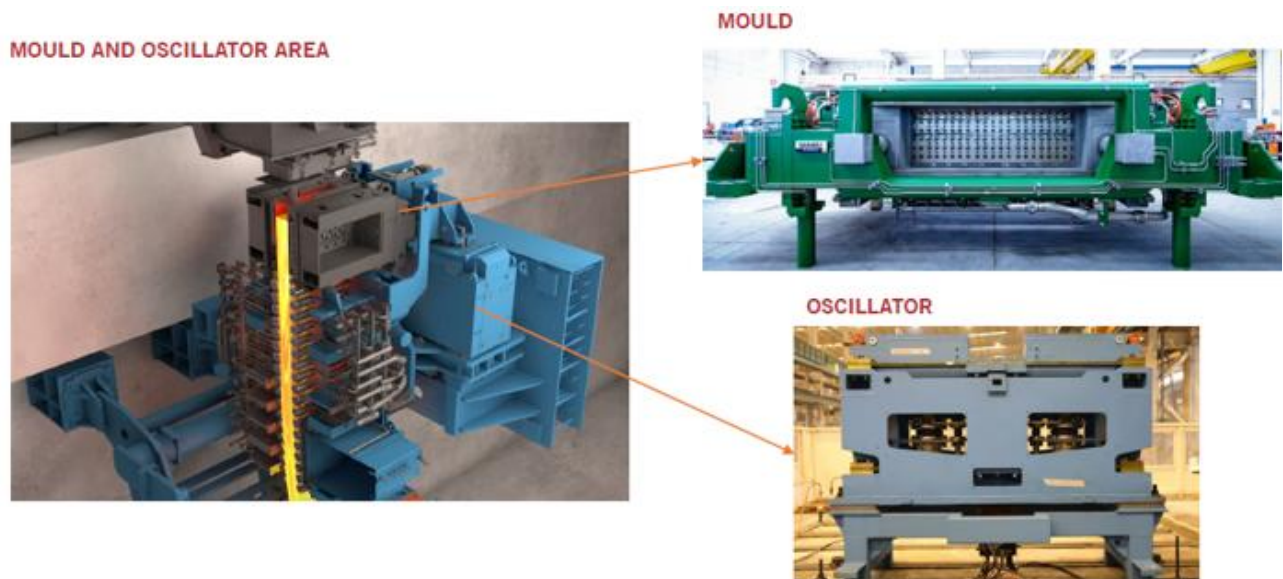


Рисунок 4.15 – Кристалізатор (MOULD) і механізм качання (OSCILLATOR)

На рисунку 4.16 зображено кристалізатор — ізометричне зображення з підключеними основними системами контролю та охолодження.

1. Copper Plates – Мідні плити

Основні елементи, які безпосередньо контактують із рідкою сталлю.

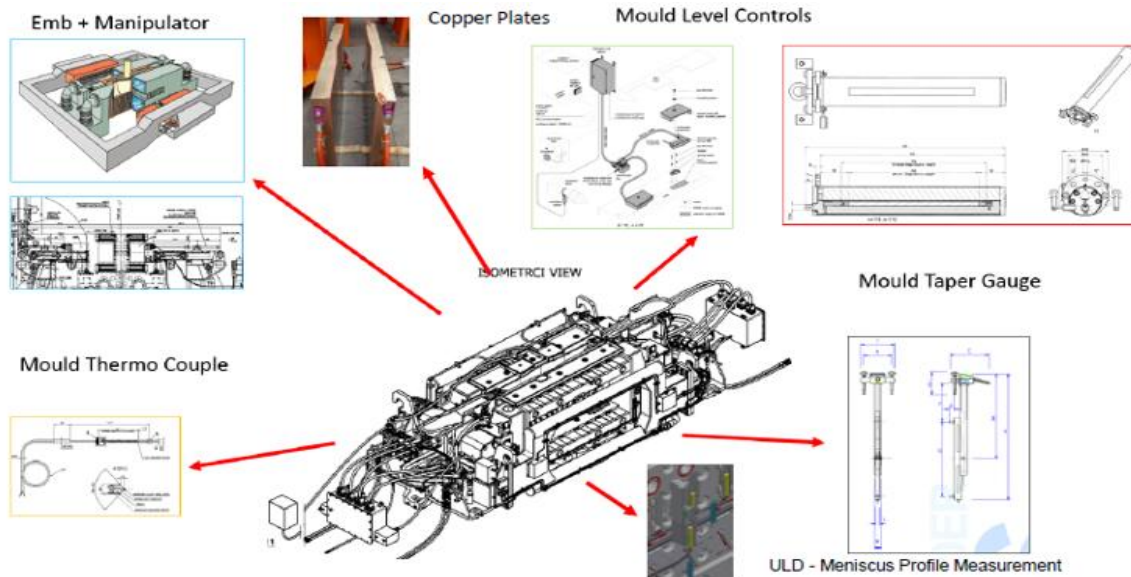


Рисунок 4.16 – Кристалізатор

Забезпечують ефективно охолодження та формування первинної твердої оболонки сляба.

Встановлюються у вузькі та широкі стінки кристалізатора.

2. Mould Taper Gauge – Шаблон конусності

Служить для контролю внутрішнього профілю кристалізатора.

Вимірює відхилення від заданої форми (звуження кристалізатора), що впливає на якість сляба.

3. Mould Thermo Couple – Термопара кристалізатора

Дає змогу контролювати температуру на виході з мідних плит.

Використовується для виявлення аномалій у тепловідведенні та перегріву.

4. Mould Level Controls – Контроль рівня сталі

Датчики (Q-Level або SEN-based) вимірюють висоту металевого меніска в кристалізаторі.

Система автоматично регулює подачу сталі через стопор або шибер.

5. ULD – Meniscus Profile Measurement

Спеціалізований датчик або камера, яка фіксує форму меніска рідкої сталі.

Важливо для контролю симетрії заливки та запобігання дефектам поверхні.

6. EMB + Manipulator – Електромагнітне перемішування

EMB (ElectroMagnetic Brake) створює обертальне або гальмівне магнітне поле для поліпшення якості кристалізації.

Маніпулятор забезпечує введення EMB у потрібну позицію без демонтажу кристалізатора.

На рисунку 4.17 зображено гідравлічну систему стискання кристалізатора.

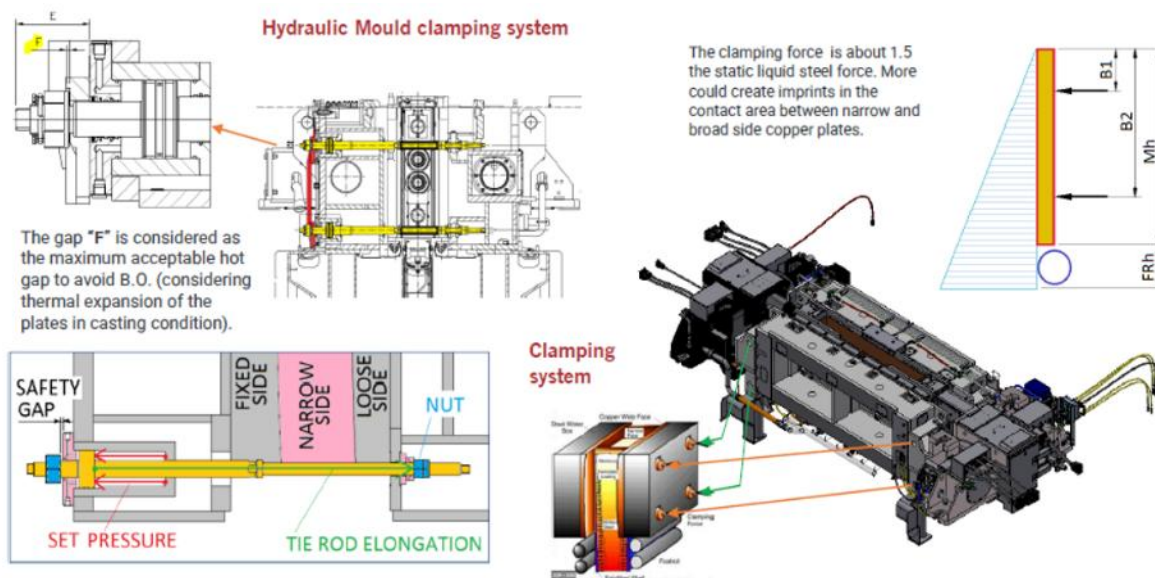


Рисунок 4.17. Гідравлічна система стискання кристалізатора

1. Загальний принцип роботи системи (в центрі та вгорі):

Гідроциліндри тиснуть на вузькі сторони мідних плит, стискаючи їх до широких боковин.

Сила стискання має бути приблизно в 1,5 рази більшою, ніж сила статичного тиску рідкої сталі. Надмірна сила може призвести до деформації мідних плит у місці контакту.

2. Зазор "F" (ліворуч угорі):

Показано допустимий зазор "F", що враховує теплове розширення мідних плит під час лиття. Його слід тримати в межах, щоб уникнути прориву сталі (Break-Out).

3. Схема подовження тяги (внизу ліворуч):

Зображено систему натягу стяжного штиря (Tie Rod):

Set Pressure — встановлений тиск в системі.

Safety Gap — безпечний зазор.

Nut — гайка регулювання.

Tie Rod Elongation — подовження штиря внаслідок зусилля.

Сторони позначені як Fixed Side, Narrow Side, Loose Side — відповідно фіксована, вузька і вільна сторони конструкції.

4. Clamping System (внизу праворуч):

Показано, як затискачі діють на вузькі сторони, притискаючи їх до широких.

Потік рідкої сталі обмежується мідними плитами, що знаходяться в тисненні.

5. Схема з геометричними розмірами (вгорі праворуч):

Показано схематичний профіль вузької мідної пластини та профіль литої заготовки.

Позначено основні розміри: B1, B2, Mh, FRH.

6. 3D-вигляд кристалізатора (праворуч):

Просторове зображення всієї системи з розміщенням гідроциліндрів, подачі води, та інших механізмів.

На рисунку 4.18 зображено еволюцію конструкції охолоджувальних каналів.

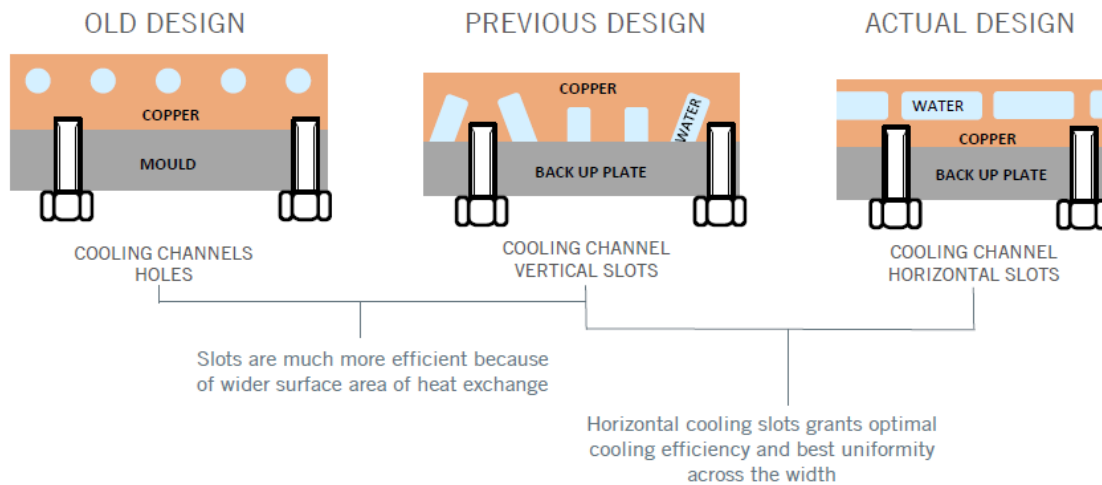


Рисунок 4.18 – Конструкції охолоджувальних каналів

1. OLD DESIGN (Стара конструкція):

Мідь (Copper) із отворами як охолоджувальні канали.

Вода проходить через отвори (holes), просвердлені в міді.

Недолік: менша площа теплообміну — відповідно, нижча ефективність охолодження.

2. PREVIOUS DESIGN (Попередня конструкція):

Мідна плита має вертикальні пази (Vertical Slots) для охолодження.

Вода проходить через пази між міддю та опорною плитою (Back-up Plate).

Перевага: вища ефективність, ніж у отворів, через збільшену площу теплообміну.

3. ACTUAL DESIGN (Актуальна конструкція):

Використовуються горизонтальні пази (Horizontal Slots) між міддю й водою.

Забезпечується максимальна рівномірність охолодження по всій ширині плити.

Найвища ефективність завдяки:

рівномірному розподілу води;

оптимальному теплообміну.

На рисунку 4.19 зображено термічний аналіз широких мідних плит кристалізатора.

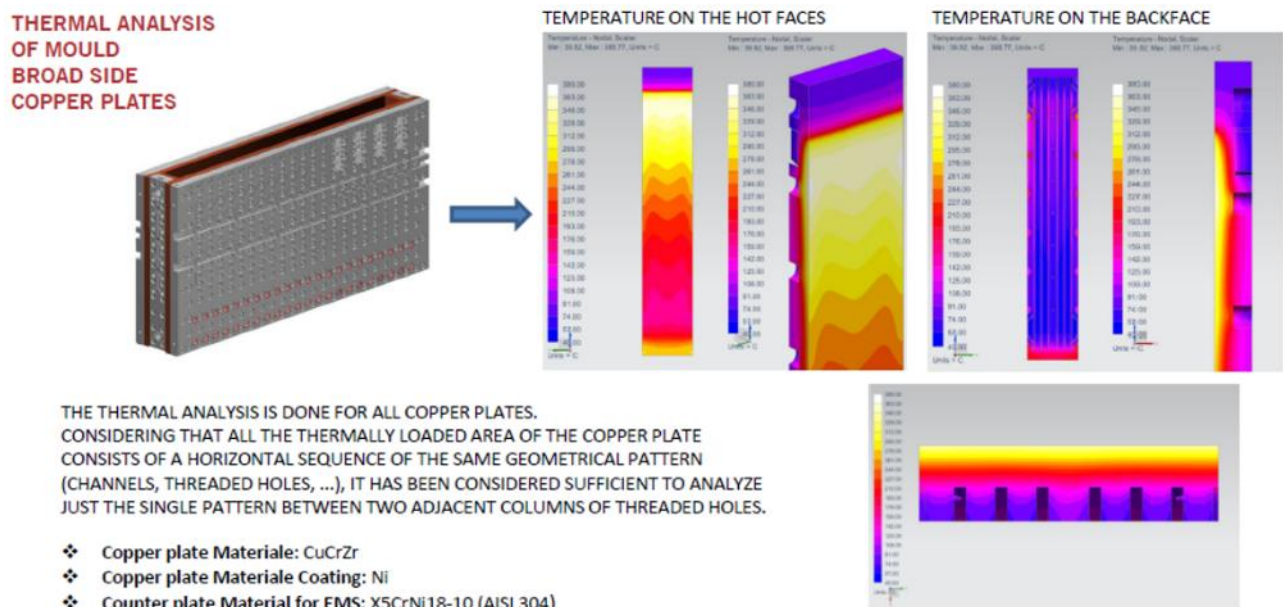


Рисунок 4.19 – Термічний аналіз широких мідних плит

THERMAL ANALYSIS OF MOULD BROAD SIDE COPPER PLATES

Термічний аналіз проводиться для всіх мідних плит з урахуванням їх

горизонтальної геометричної повторюваності (канали, різьбові отвори тощо). Тому достатньо аналізувати лише одну типову комірку між двома отворами.

1. Зліва:

3D-модель мідної плити з отворами та каналами для охолодження. Вона і є об'єктом аналізу.

2. Справа: Теплові карти

TEMPERATURE ON THE HOT FACES (ліве зображення):

Показує температуру на поверхні, яка контактує з рідкою сталлю.

Температура досягає до 308°C у центральній зоні.

Помітний градієнт температури — від 75°C на краях до понад 300°C в центрі.

TEMPERATURE ON THE BACKFACE (праве зображення):

Відображає температуру на тильній стороні плити.

Завдяки охолодженню, температура суттєво нижча — добре видно канали з холодною водою (сині зони).

Максимум такий же ($\sim 308^{\circ}\text{C}$), але основна частина поверхні має нижчі значення.

Внизу справа (горизонтальний переріз):

Демонструє температурне поле вздовж ширини плити.

Помітні горизонтальні шари тепла, що вказує на ефективність охолодження через пази.

3. Матеріали:

Матеріал мідної плити: CuCrZr (мідь з хромом і цирконієм) — висока теплопровідність та механічна міцність.

Покриття: нікель (Ni) — для зниження зношування та захисту від корозії.

ілюструють профіль плити, допуски, глибину фрезерування та розміщення контрольної канавки.

Табл. 4.1. Дані для семи циклів ремеханінгу.

Етап	Кількість плавок	Видалена товщина (мм)	Залишкова товщина (мм)
NEW	—	—	10,0 мм
1-й	900	1,4 мм	8,6 мм
2-й	900	1,4 мм	7,2 мм
3-й	900	1,4 мм	5,8 мм
4-й	900	1,4 мм	4,4 мм
5-й	900	1,4 мм	3,0 мм
6-й	900	1,4 мм	1,6 мм
7-й	900	1,4 мм	0,2 мм

Матеріал плити: CuCrZr з нікелевим покриттям (Ni) — згідно з попередніми даними.

На рисунку 4.21 зображено принцип дії датчика рівня металу в кристалізаторі типу "Eddy Current" (вихрові струми).

Рис. 4.21. Принцип дії датчика рівня металу в кристалізаторі типу "Eddy Current" (вихрові струми).

Mould Level Eddy Current Type

- 2 coils that can be installed in the same detector, or in split detectors.
- One output signal used for Mould Level Control – analog signal 4-20 mA
Reading range from 20 to 200 mm from TOC.
- Reading from the independent coils (Left/Right) can be visualized through the data exported by profinet/profibus.
- An extended reading range of up to 300 mm from TOC can be visualized through data exported by profinet/profibus

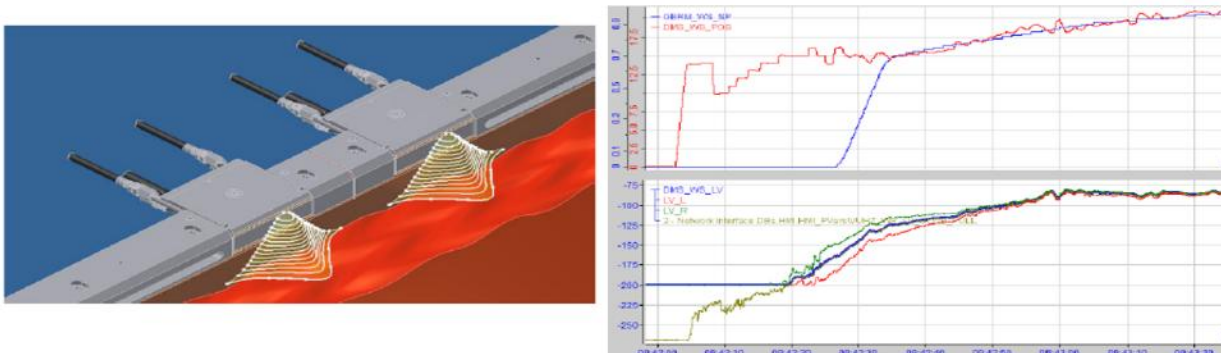


Рисунок 4.21. Принцип дії датчика рівня металу в кристалізаторі типу "Eddy Current" (вихрові струми).

Mould Level Eddy Current Type – Основні характеристики:

2 індукційні котушки, які можуть бути встановлені:

або в одному детекторі,

або як розділені датчики (split detectors).

Вихідний сигнал: аналоговий, 4–20 мА, використовується для системи контролю рівня металу (Mould Level Control, MLC).

Діапазон вимірювання:

20–200 мм від TOC (top of copper — верхня поверхня мідної плити).

До 300 мм — при використанні розширеного режиму через інтерфейси Profinet/Profibus.

Окреме зчитування від лівої/правої котушки:

Може бути візуалізовано через цифровий зв'язок із системою керування (Profinet/Profibus).

Графіки праворуч:

Відображають зміну рівня металу у часі:

Верхній графік — сигнал позиціювання або встановлене значення (Set Point) і фактична позиція.

Нижній графік — реальні виміри рівня лівого (LV_L) і правого (LV_R) каналів.

Це дає змогу точно контролювати коливання рівня рідкої сталі в кристалізаторі та забезпечити рівномірне формування заготовки.

На рисунку 4.22 зображено зміну ширини без зупинки процесу.

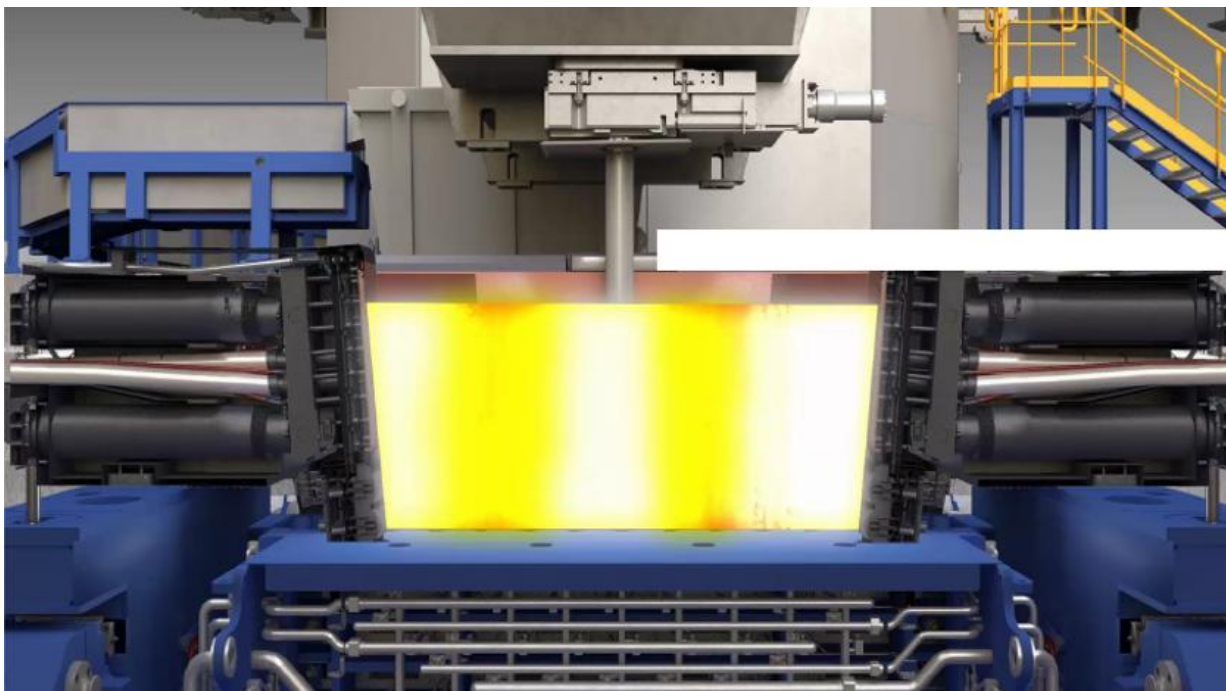


Рисунок 4.22. Зміна ширини без зупинки процесу

На рисунку 4.23 зображено електромеханічну систему приводу вузьких плит кристалізатора (Electro Mechanical Driven System).

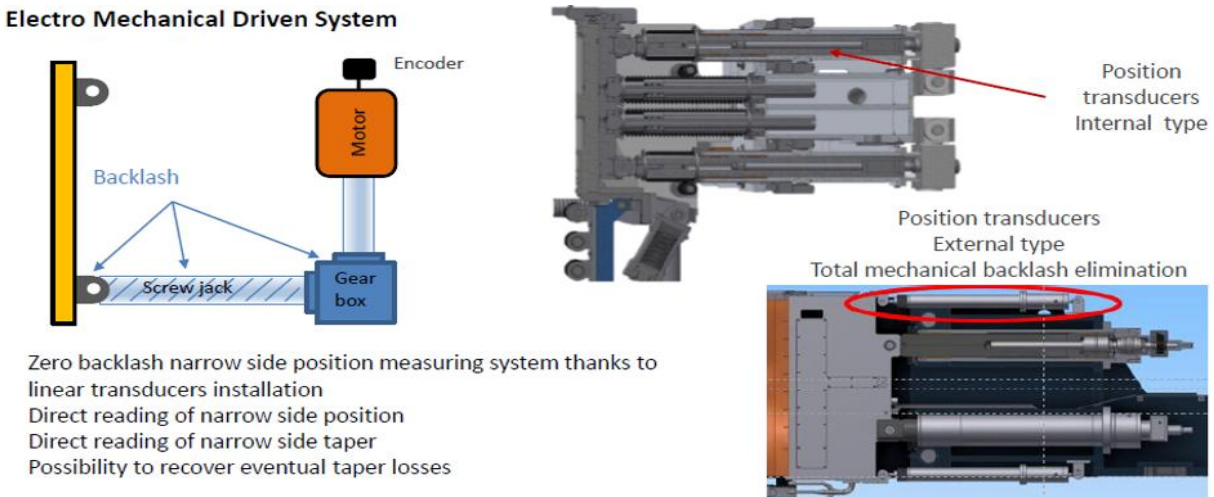


Рисунок 4.23. Електромеханічна система приводу вузьких плит кристалізатора

Принцип дії:

Мотор + Редуктор (Gear box) обертає гвинтову пару (Screw jack). Лінійний переміщувач забезпечує рух вузької сторони мідної плити.

Вказано проблему "Backlash" — механічний люфт, який тут усувається.

Внутрішні датчики положення (Internal transducers) встановлені безпосередньо в приводі — забезпечують точне визначення положення вузької сторони.

Зовнішні датчики положення (External transducers) дають змогу: повністю усунути механічний люфт; забезпечити високоточне керування.

Це все дає функціональні переваги системи:

Нульовий люфт завдяки встановленню лінійних датчиків (transducers).

Пряме зчитування положення вузької сторони (narrow side).

Пряме зчитування конусності (taper) вузької сторони.

Можливість компенсації втрат конусності (від зносу або деформацій).

На рисунку 4.24 зображено гідравлічну систему приводу вузьких плит кристалізатора (Hydraulic Driven System) для зміни ширини заготовки в режимі онлайн.

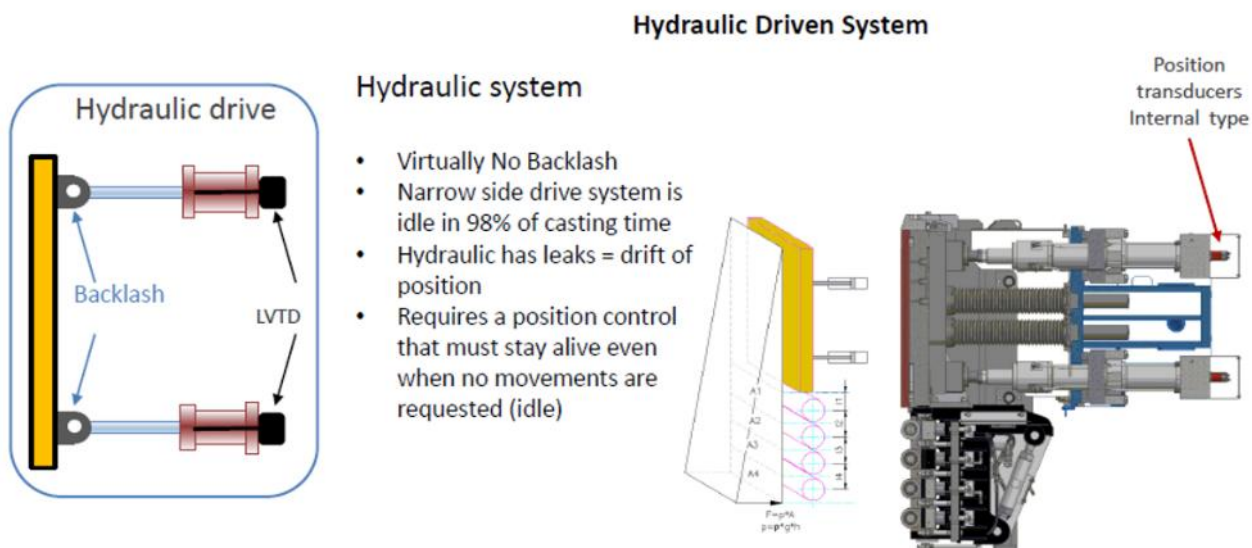


Рисунок 4.24. Гідравлічна система приводу вузьких плит кристалізатора

Складові системи:

Ліва частина — принципова схема:

Hydraulic drive — гідравлічні циліндри з датчиками положення (LVTD).

Проблема Backlash (люфт) показана стрілками — зазвичай невеликий.

Система працює через подачу рідини під тиском до поршнів.

Права частина — реальна система:

Зображено вузол приводу вузької сторони.

Використовуються внутрішні датчики положення (internal type).

Плити рухаються синхронно для зміни ширини заготовки.

На рисунку 4.25 зображено контроль температури мідних плит кристалізатора за допомогою системи Q-MAP.

Equipment:



Thermocouples are installed on all four copper plates of the mould.

Q-MAP algorithms analyzes the trend of the temperature of each position and provides feedback if any anomalous condition is identified.

Q-MAP algorithms are:

- **Sticking**
- Hot/Cold Spots
- Longitudinal Face Crack
- Cold Tooth Depression
- Primary Cooling Failure
- Bias Flow

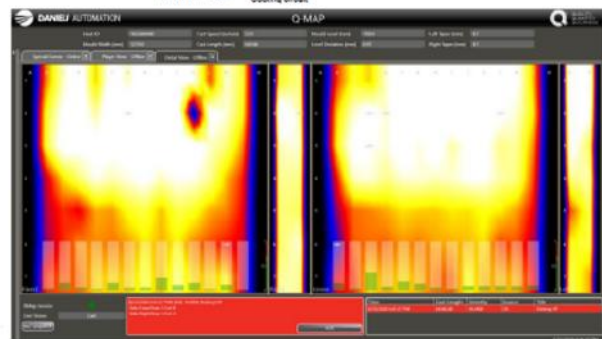
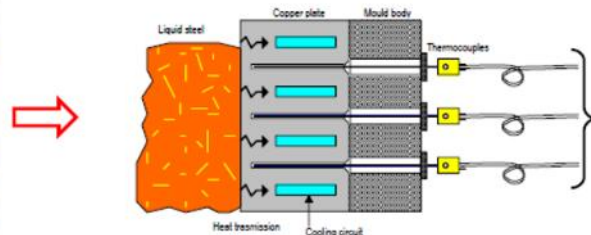


Рисунок 4.25. Контроль температури мідних плит кристалізатора за допомогою системи Q-MAP

Опис обладнання:

Термопари встановлюються на всіх чотирьох мідних плитах кристалізатора.

Вони безперервно вимірюють температуру в різних точках по висоті та ширині плити.

Дані передаються до системи Q-MAP для аналізу.

Принцип роботи Q-MAP:

Аналізується динаміка температурних змін у режимі реального часу.

Якщо виявлено аномалії — система надає зворотний зв'язок (feedback) оператору або до автоматизованої системи керування.

Алгоритми Q-MAP дозволяють виявити:

Sticking – прилипання твердої оболонки до мідної плити.

Hot/Cold Spots – локальні перегриви або переохолодження.

Longitudinal Face Crack – поздовжні тріщини на поверхні.

Cold Tooth Depression – зони нерівномірного охолодження.

Primary Cooling Failure – несправності у первинному охолодженні.

Bias Flow – нерівномірний потік охолоджувача.

Схеми праворуч:

Середня схема пояснює розміщення термопар:

Встановлені між мідною плитою та тілом кристалізатора.

Передають дані про теплообмін між рідкою сталлю та охолоджувальним контуром.

Нижній скріншот – інтерфейс системи Q-MAP:

Показано температурні карти в реальному часі.

Яскраві зони сигналізують про аномальні температури, які можуть свідчити про дефекти чи небезпечні стани.

На рисунку 4.26 зображено ультразвукову систему вимірювання рівня сталі та профілю меніска.

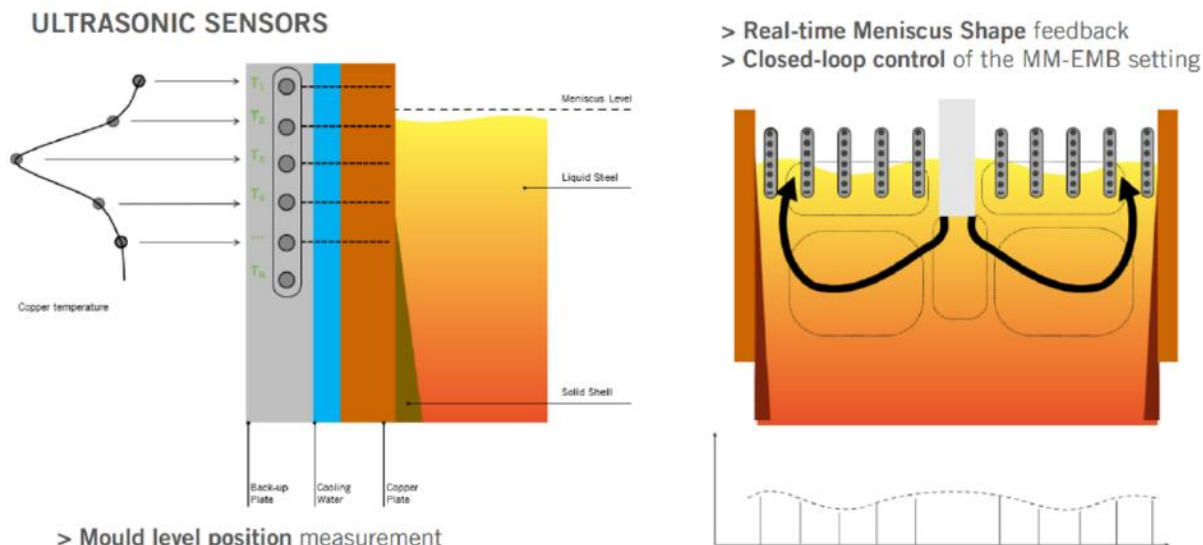


Рисунок 4.26 – Ультразвукова система вимірювання рівня сталі та профілю

Принцип роботи:

В мідні плити кристалізатора інтегровані ультразвукові датчики, які:

Постійно вимірюють температурний профіль через товщу міді (T_1 , T_2 , ..., T_n).

Визначають рівень меніска (Meniscus level) за зміною температури й акустичних властивостей.

Визначають форму рідкої сталі в зоні меніска.

Вимірюються:

Температура міді (впливає на тепловідведення).

Положення твердої оболонки (Solid shell).

Рівень рідкої сталі (Liquid steel level).

Використовується для точного вимірювання рівня сталі у кристалізаторі (Mould level position measurement).

ULD Sensor – Права частина:

Переваги:

Дає зворотний зв'язок у реальному часі про форму меніска.

Забезпечує замкнуте керування (closed-loop) системою електромагнітного перемішування (ММ-ЕМВ).

Допомагає підтримувати рівномірність потоку, стабільність рівня, контроль перегріву/переохолодження.

Принцип роботи:

Показано розташування множини ультразвукових датчиків по ширині кристалізатора.

Система реєструє зміну положення меніска зліва, справа та по центру.

Дані використовуються для автоматичного регулювання ЕМВ та інших параметрів процесу.

На рисунку 4.27 зображено електромагнітне перемішування рідкої сталі в кристалізаторі (ММ-ЕМВ або М-EMS).

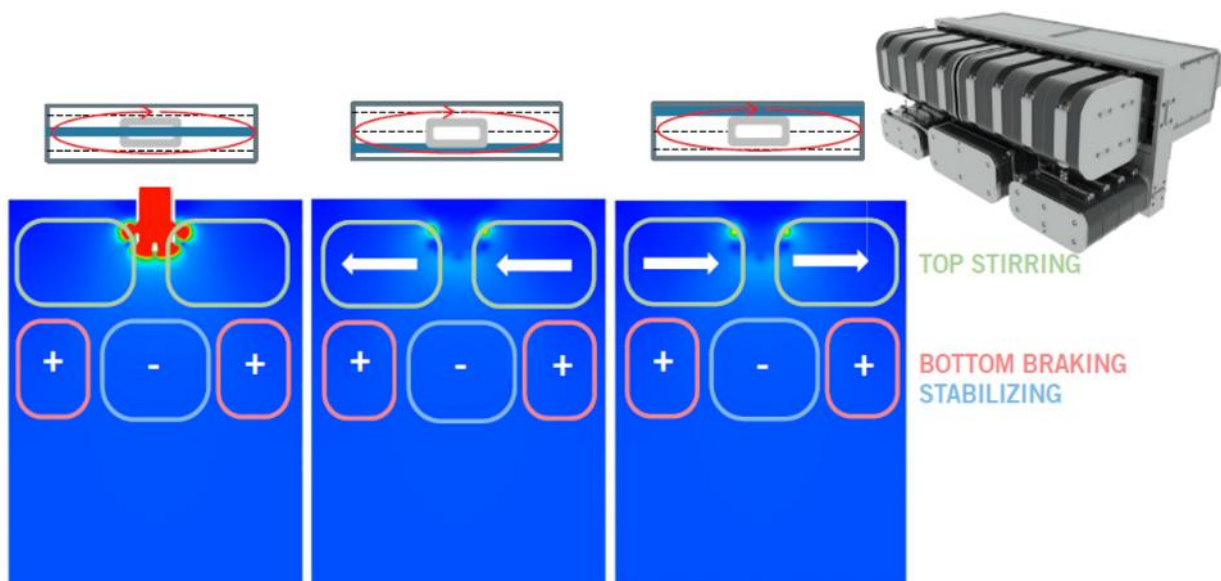


Рисунок 4.27. Електромагнітне перемішування рідкої сталі в кристалізаторі

Принцип дії системи:

Схема зверху (поперечні розрізи):

Показано розташування магнітних котушок і напрямки електромагнітного перемішування.

Кожне поле створює контрольовані вихори в сталі, які змінюють структуру потоку.

Ліва зона (вплив без перемішування):

Потік рідкої сталі із SEN (Submerged Entry Nozzle) створює неконтрольовану турбулентність.

Це призводить до нерівномірного розподілу включень, перегріву або прилипання оболонки.

Центральна зона — TOP STIRRING (верхнє перемішування):

Електромагнітні поля активуються біля меніска.

Силкові лінії створюють горизонтальні циркуляційні потоки, що:

Вирівнюють температуру;

Сприяють рівномірному розподілу неметалевих включень;

Покращують форму меніска (корисно для якісної поверхні заготовки).

Права зона — BOTTOM BRAKING / STABILIZING (нижнє гальмування/стабілізація):

Електромагнітне поле впливає на глибші шари сталі.

Потік сповільнюється, створюється зона стабілізації:

Зменшується турбулентність;

Покращується формування твердої оболонки;

Мінімізується ризик утворення дефектів у центрі заготовки.

Обладнання праворуч:

Зображена модульна система електромагнітного перемішування (EMBr), яка монтується ззовні кристалізатора.

Забезпечує неконтактну дію на потік рідкого металу через магнітне поле.

На рисунку 4.28 зображено електромагнітне перемішування усередині роликів у зоні вторинного охолодження (IR-EMS — In-Roll Electromagnetic Stirrer).

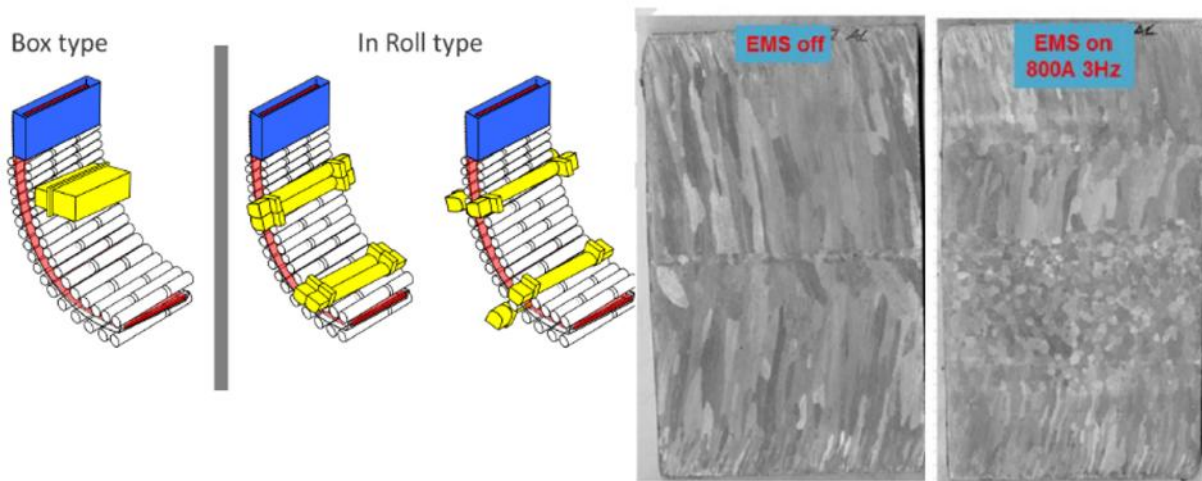


Рисунок 4.28 Електромагнітне перемішування усередині роликів у зоні вторинного охолодження

Конструктивні типи:

Box type:

Статор розміщується поза роликами, як зовнішній блок.

Генерує магнітне поле, яке проникає в рідку або напівтверду сталь.

In-Roll type:

Інтегровані електромагніти безпосередньо в самі ролики.

Дає змогу точніше впливати на структуру сталі без зайвих втрат енергії.

Займає менше простору в лінії.

Порівняння структури злитка:

EMS off (ліворуч):

Велика кількість поздовжніх структур, порушена центральна зона.

Слабка змішаність — сегрегація, дендритні ростки.

EMS on (праворуч, 800 A, 3 Hz):

Рівномірне перемішування в центральній зоні злитка.

Поліпшена глобулярна структура, менше макросегрегацій.

Краща центральна якість та менше дефектів.

Переваги IR-EMS:

Покращення центральної зони заготовки.

Зменшення макросегрегації і центральної пористості.

Поліпшення механічних властивостей продукції.

Дає можливість тоншого або швидшого лиття без шкоди для якості.

Механізм качання— це механізм, що здійснює зворотно-поступальний рух кристалізатора, імітуючи вертикальні коливання.

На рисунку 4.29 зображено механізм, що здійснює зворотно-поступальний рух кристалізатора, імітуючи вертикальні коливання.

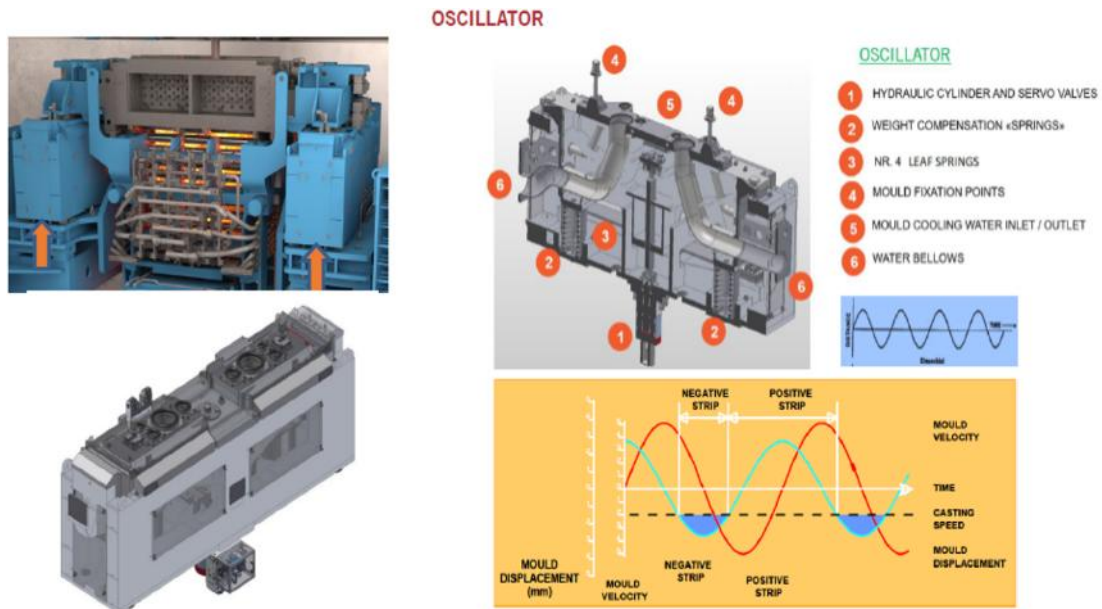


Рис. 4.29. Механізм качання

1. Конструкція механізм качання (в центрі праворуч):

Позначені ключові компоненти:

Гідравлічний циліндр і сервоклапани – забезпечують зворотно-поступальний рух кристалізатора.

Система компенсації ваги («пружини») – зменшує навантаження на привід.

Пластинчасті пружини (Leaf Springs) – стабілізують рух і направляють хід.

Кріплення кристалізатора – точки фіксації до рами.

Вхід/вихід охолоджуючої води – забезпечує охолодження мідних плит.

Гофровані патрубки (bellows) – захищають гнучкі підключення від деформацій при русі.

2. Візуалізація осцилятора в роботі (угорі зліва):

Показано, як осцилятори переміщують кристалізатор вертикально вгору і вниз.

Вказано напрямки коливального руху під час лиття.

3. Рух кристалізатора — синусоїда (нижня частина):

Суть:

Осциляція модулюється синусоїдально або близько до неї.

"Positive strip" – рух кристалізатора в напрямку витягування сляба.

"Negative strip" – рух проти витягування.

На графіку:

Червона крива – швидкість кристалізатора.

Синя крива – його переміщення.

Стрілка – постійна швидкість лиття.

4. Функції осциляції:

Запобігання прилипанню твердої оболонки до мідних плит.

Полегшення входження шлаку між сталь і кристалізатор.

Зниження ймовірності поверхневих тріщин.

На рисунку 4.30 - зображено принцип дії та елементи кристалізатора.

1. Leaf Springs — направляючі елементи осцилятора:

Використовуються 4 листові пружини, які:

Кріпляться зовні до нерухомої рами та до рухомої середньої частини;

Забезпечують направлення і стабільність коливань лише у вертикальній площині;

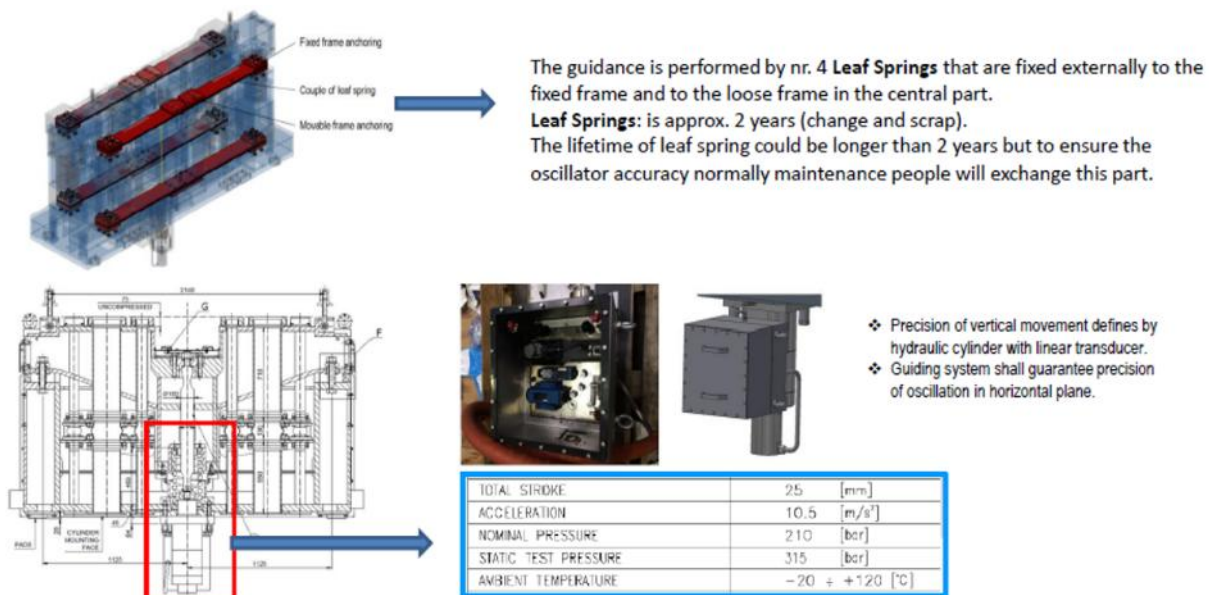


Рисунок 4.30 – Принцип дії та елементи механізму качання кристалізатора

Запобігають горизонтальному люфту кристалізатора під час руху.

Термін служби:

Орієнтовно 2 роки (рекомендована планова заміна).

Можуть служити довше, але для забезпечення точності їх змінюють на обслуговуванні.

Технічні параметри гідроциліндра зображено в таблиці 4.2.

Табл. 4.2. Параметри гідроциліндра.

Параметр	Значення
Хід (Total Stroke)	25 мм
Прискорення	10,5 м/с ²
Номінальний тиск	210 бар
Статичне випробування	315 бар
Температура середовища	-20...+120 °C

3. Додаткові особливості:

Точність вертикального руху задається гідроциліндром з лінійним датчиком положення.

Система направлення (leaf springs) гарантує точність в горизонтальній площині.

Це необхідно для рівномірного змащення, контролю за зазором між плитами та якісного формування поверхні сляба.

На рисунку 4.31 зображено опорну раму механізму качання

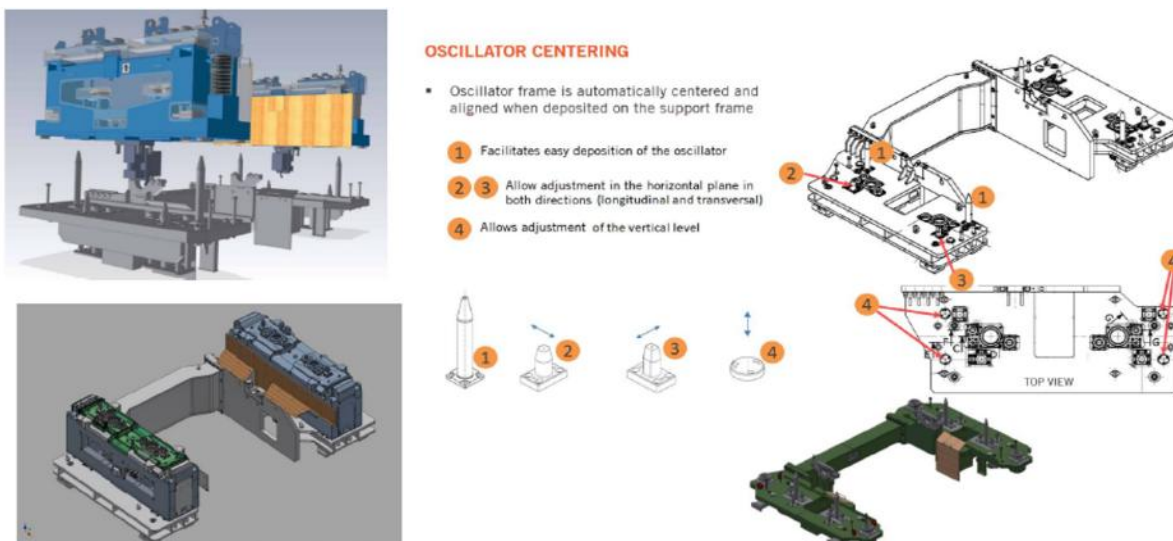


Рисунок 4.31 – Опорна рама механізму качання

OSCILLATOR CENTERING – Центрування осцилятора:

Рама осцилятора автоматично центрується при встановленні на опорну раму.

Це значно спрощує монтаж і заміну.

Основні функції (позначені 1–4):

Полегшує встановлення осцилятора (без зміщень).

Регулювання у горизонтальній площині — як в поздовжньому, так і у поперечному напрямках.

Точне вирівнювання по горизонталі для забезпечення паралельності.

Регулювання по висоті (вертикальний рівень).

Зображення і пояснення:

Зліва вгорі — 3D-модель встановлення осцилятора на раму.

Праворуч — креслення і ключові позиції системи регулювання (позиції 1–4).

Знизу — ізометрична візуалізація опорної рами з елементами вирівнювання.

Схематично (1→4) — окремі вузли: напрямні штирі, упори, плити вирівнювання.

Технічні переваги:

Забезпечує швидкий монтаж/демонтаж осцилятора.

Дозволяє високоточне вирівнювання, необхідне для стабільної роботи кристалізатора.

Покращує повторюваність та точність осциляцій при кожному обслуговуванні.

4.3 Дільниця вторинного охолодження (SEGMENTS AREA)

На рисунку 4.32 зображено механічну конструкцію сегмента та його основні механічні компоненти.

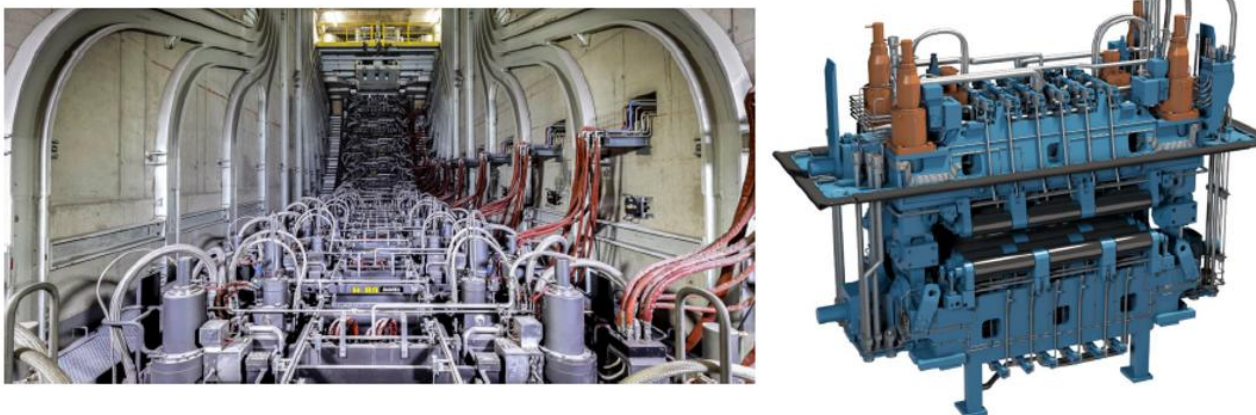


Рисунок 4.32 Дільниця вторинного охолодження

Segments Area — це частина машини безперервного лиття, яка розташована нижче кристалізатора, на криволінійній ділянці МБЛЗ. На рисунку 4.32 візуально зображено дільницю вторинного охолодження

На рисунку 4.33 зображенно механічні компоненти сегмента зони вторинного охолодження

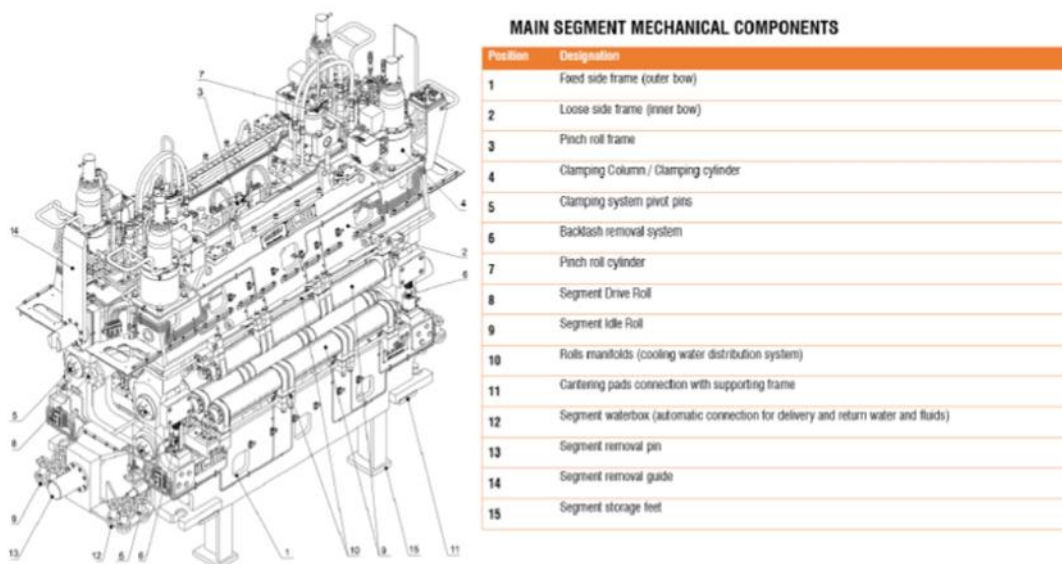


Рисунок 4.33 – Механічні компоненти

Основні компоненти сегмента (Main Segment Mechanical Components) зображено в таблиці 4.3

Таблиця 4.3- Основні компоненти

№	Назва (англійською)	Опис
1	Fixed side frame (outer bow)	Жорстка бокова рама (зовнішня частина дуги) – забезпечує фіксацію сегмента.
2	Loose side frame (inner bow)	Рухома бокова рама (внутрішня частина дуги) – дозволяє відкривати сегмент для заміни або обслуговування.
3	Pinch roll frame	Рама прижимних роликів – утримує ролики, що стабілізують заготовку.
4	Clamping column / cylinder	Затискна колонка з гідроциліндром – відповідає за притискну силу.
5	Clamping system pivot pins	Осьові пальці системи затиску – забезпечують рухомість при відкритті сегмента.
6	Backlash removal system	Система усунення люфту – забезпечує точність позиціонування.
7	Pinch roll cylinder	Циліндр притиску – керує положенням прижимних роликів.
8	Segment drive roll	Приводний ролик сегмента – передає рух заготовці.
9	Segment idle roll	Неприводний ролик – забезпечує підтримку заготовки.
10	Rolls manifolds (cooling water)	Колектори подачі охолоджувальної води до роликів.
11	Centering pads connection	З'єднання з центрувальними подушками на рамі підтримки.
12	Segment waterbox	Водобокс – автоматичне підключення для подачі/відведення води і рідин.
13	Segment removal pin	Штифт для зняття сегмента – фіксує сегмент під час демонтажу.
14	Segment removal guide	Напрямна для зняття сегмента – полегшує демонтаж.
15	Segment storage feet	Опори для зберігання сегмента – забезпечують його стійке розміщення поза машиною.

На рисунку 4.34 зображено раму сегмента.

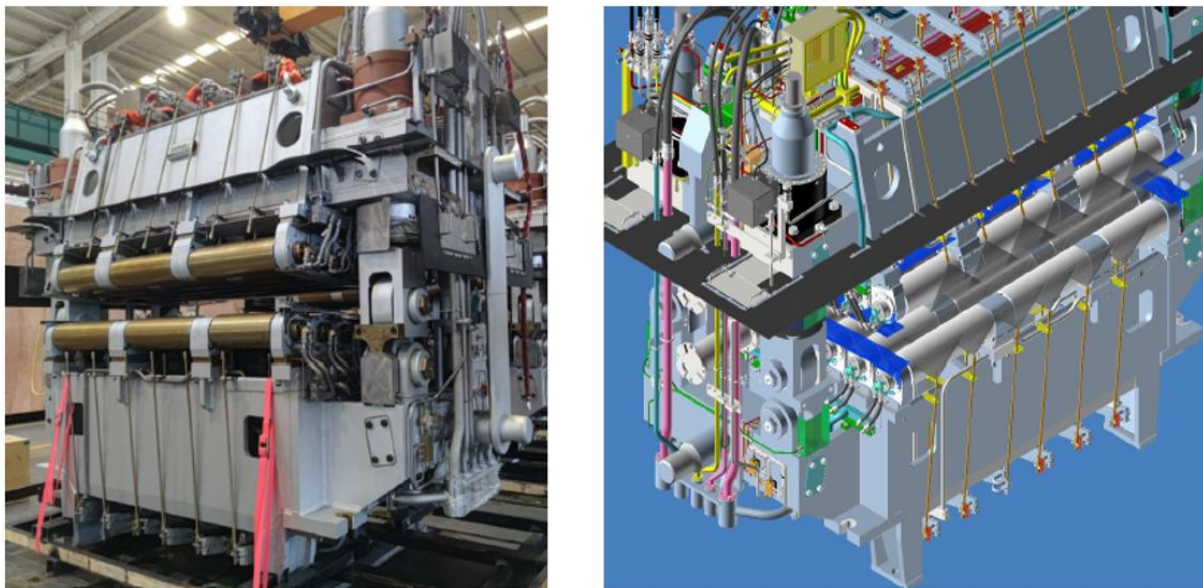


Рисунок 4.34. Рама сегмента.

На рисунку 4.35 зображено кінематику сегментів МБЛЗ.

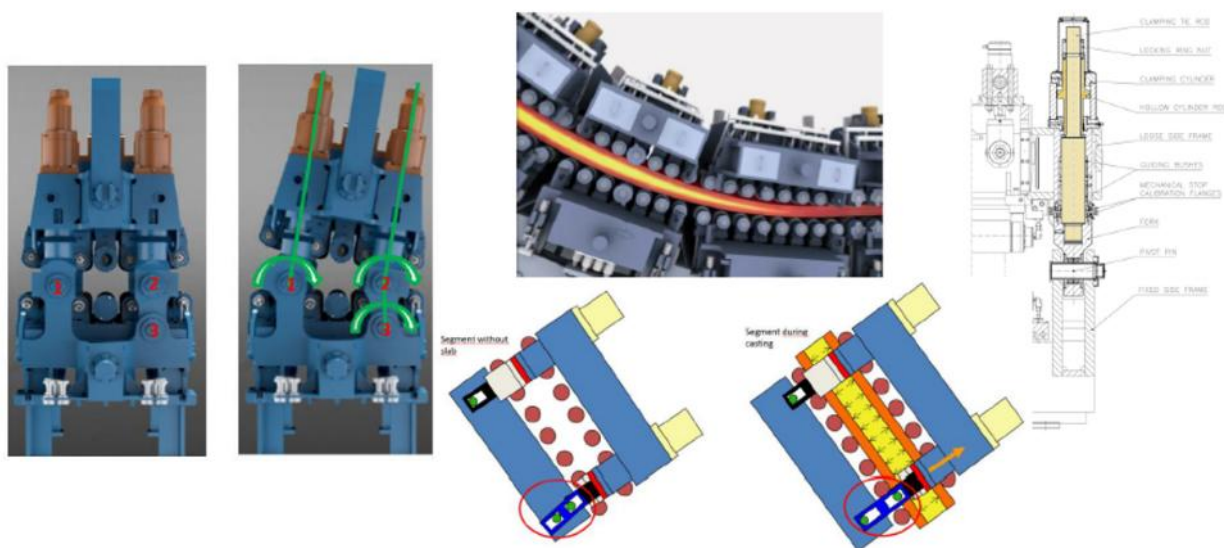


Рисунок 4.35. Кінематика сегментів МБЛЗ.

Шарнірне з'єднання з двома точками обертання встановлюється на виході сегмента, щоб забезпечити контрольований рух роликів, відповідний профілю м'якого обтиснення сляба.

Лівий стовпець:

Фронтальний вигляд сегмента з позначеними шарнірами:

Зліва — статичний вигляд із трьома номерами (1, 2, 3) — це точки обертання та з'єднання;

Справа — зображено, як ці точки дозволяють нахил рухомої частини, відстежуючи профіль зливка;

Зелені дуги — траєкторії обертання частин сегмента.

Центр (вгорі):

Візуалізація вигнутого зливка в сегментній зоні:

Видно, як рідкий сляб проходить крізь ролики, і при цьому кінематика сегментів дозволяє плавно стискати його;

Це критично важливо для запобігання усадковим дефектам у центрі зливка.

Правий верхній кут:

Поперечний кресленик сегмента:

Показано будову гідроциліндра, штоків, упорів, направляючих і з'єднання з нерухомою рамою;

Акцент на точності регулювання положення рухомої частини (Loose Side Frame).

Нижня частина (2 схеми):

Зліва: без сляба — ролики у вихідному положенні, шарнір знятий з навантаження;

Справа: під час лиття — сляб тисне на ролики, які передають зусилля на систему через шарніри;

Червоне коло вказує на місце зсуву або деформації, яке компенсується через обертання навколо 2 pivot points.

Суть:

Дві точки обертання дозволяють забезпечити правильну деформацію при подачі зливка;

Важливо для точного контролю тиску на сляб;

Забезпечує плавну деформацію відповідно до розрахованого профілю — це ключ для soft reduction;

Мінімізує центральні усадкові дефекти, підвищує якість напівфабрикату.

На рисунку 4.36 зображено конструкцію та роботу вузла Pinch Roll (прижимних роликів).

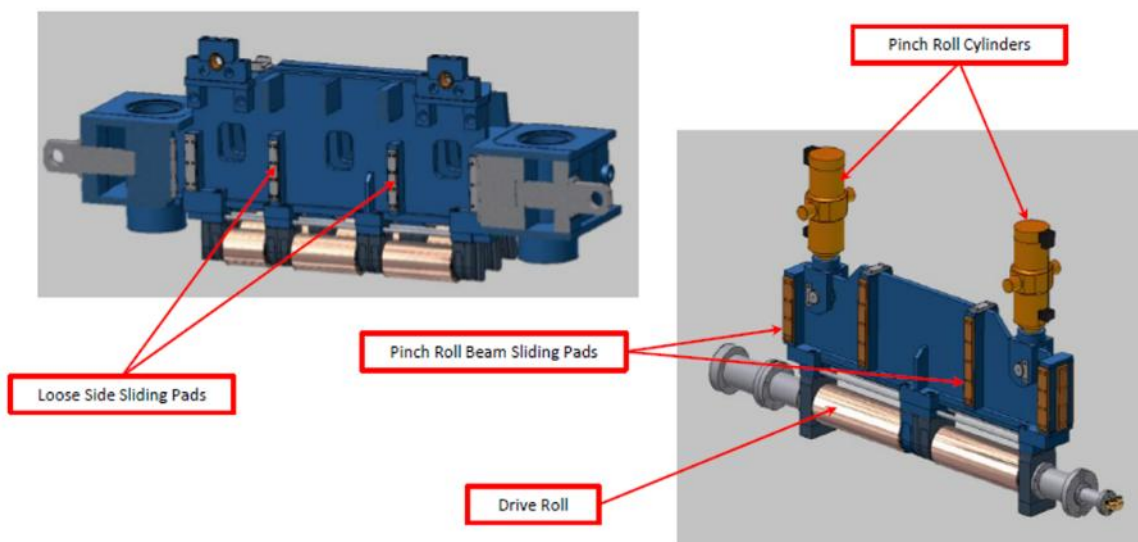


Рисунок 4.36. Конструкція та робота вузла Pinch Roll (прижимних роликів)

Ліва ілюстрація:

Loose Side Sliding Pads – ковзні напрямні, які дозволяють рух рухомої сторони сегмента (Loose Side Frame);

Pinch Roll Beam Sliding Pads – напрямні балки прижимного ролика, забезпечують точне позиціонування;

Drive Roll – ведучий ролик, який захоплює зливоч і передає тягу.

Права ілюстрація:

Pinch Roll Cylinders – гідроциліндри, які керують рухом прижимної рами, стискаючи або розтискаючи ролики з певним тиском;

Видно обидва ролики та всю конструкцію прижимного вузла в ізометрії.

Функціональне значення:

Роль вузла прижимних роликів:

Утримання сляба під контролем у критичних зонах охолодження;

Передача приводу через drive roll для витягування зливка;

Плавне стискання сляба під час soft reduction.

Гідравлічне керування:

Забезпечує постійний тиск на зливоч, компенсуючи зміну температури та товщини;

Автоматично адаптується до змін у процесі лиття.

Ковзні напрямні:

Підтримують точне вирівнювання;

Зменшують тертя;

Полегшують демонтаж та обслуговування.

На рисунку 4.37 зображено систему вторинного охолодження сегментів.

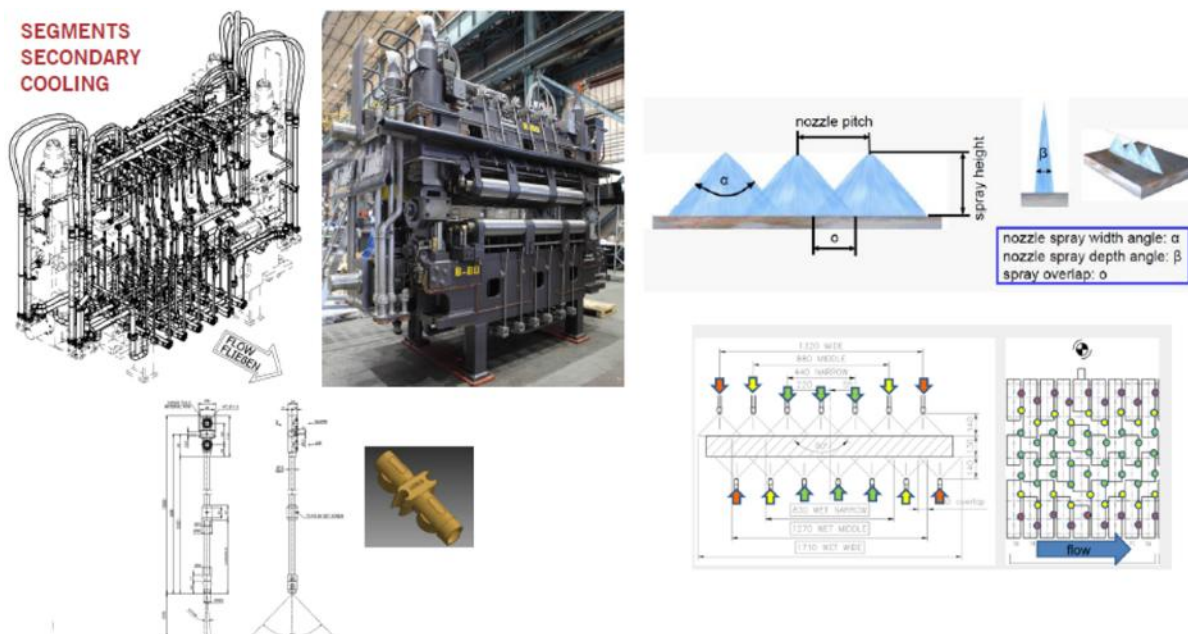


Рисунок 4.37.- Система вторинного охолодження сегментів

Ліва частина:

Технічний креслярський вигляд системи трубопроводів і форсунок охолодження (розпилювального типу);

Позначено напрям потоку (Flow direction);

Видно форсунки, трубки, фітинги та їх компоновку в сегменті.

Центр:

Фактичне фото сегмента з повністю зібраною системою охолодження;

Видно колектори, з'єднання труб та спреї.

Права частина (схеми розпилу):

Геометрія форсунки:

Кут розпилу по ширині: α

Кут розпилу по глибині: β

Перекриття струменів: o (overlap)

Пояснено важливість точного розташування форсунок для рівномірного охолодження;

Схема розміщення форсунок по ширині сляба (для narrow / middle / wide).

Призначення системи:

Плавне охолодження сляба з точним контролем температури;

Попередження тріщиноутворення через рівномірність розпилу;

Регульованість охолодження залежно від ширини та товщини сляба;

Оптимізація розходу води за допомогою зонального керування;

Фільтрація та контроль подачі води через багаторівневу систему (flow filter, nozzles, zones).

На рисунку 4.38 зображено концепцію проектування опорних (вільнооберткових) роликів (Idle Rolls).

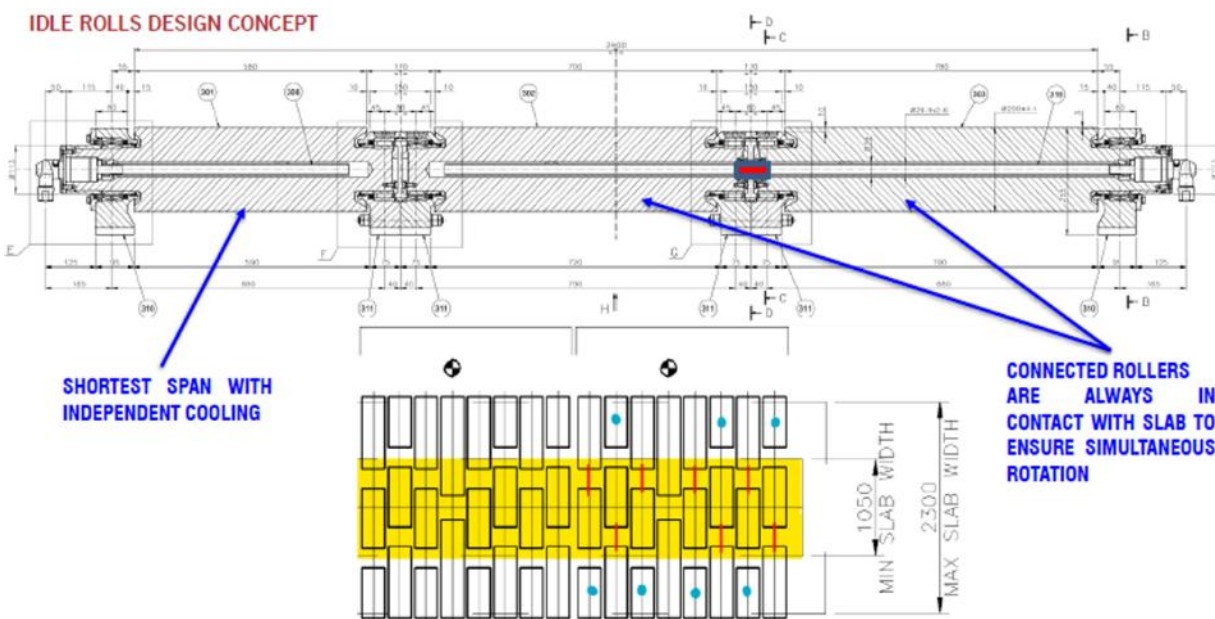


Рисунок 4.38. Концепція проектування опорних (вільнооберткових) роликів.

Верхня частина (поздовжній розріз ролика):

Найкоротша консольна довжина валу (Shortest Span) — для зменшення прогину при навантаженні;

Незалежне охолодження роликів — охолоджувальні канали всередині вала забезпечують стабільну температуру;

З'єднання роликів між собою (Connected Rollers) — гарантує синхронне обертання, навіть коли частина ролика не контактує зі слябом.

Нижня частина (вид зверху, схема розташування роликів у сегменті):

Жовтим кольором виділена зона контакту сляба;

Ролики в кожному ряду з'єднані між собою — навіть при мінімальній ширині сляба (1050 мм) мінімум один ролик у ряду контактує із слябом — це забезпечує обертання всіх з'єднаних роликів.

Переваги такої конструкції:

Забезпечує стійкість сляба в сегменті;

Підвищує точність геометрії (зменшення стріли прогину);

Уніфіковане охолодження роликів;

Забезпечує довговічність підшипників і вала;

Мінімізує ризик ковзання сляба по роликах (через синхронне обертання).

На рисунку 4.39 зображено конструкцію опорних роликів (idle rolls) з елементами охолодження.

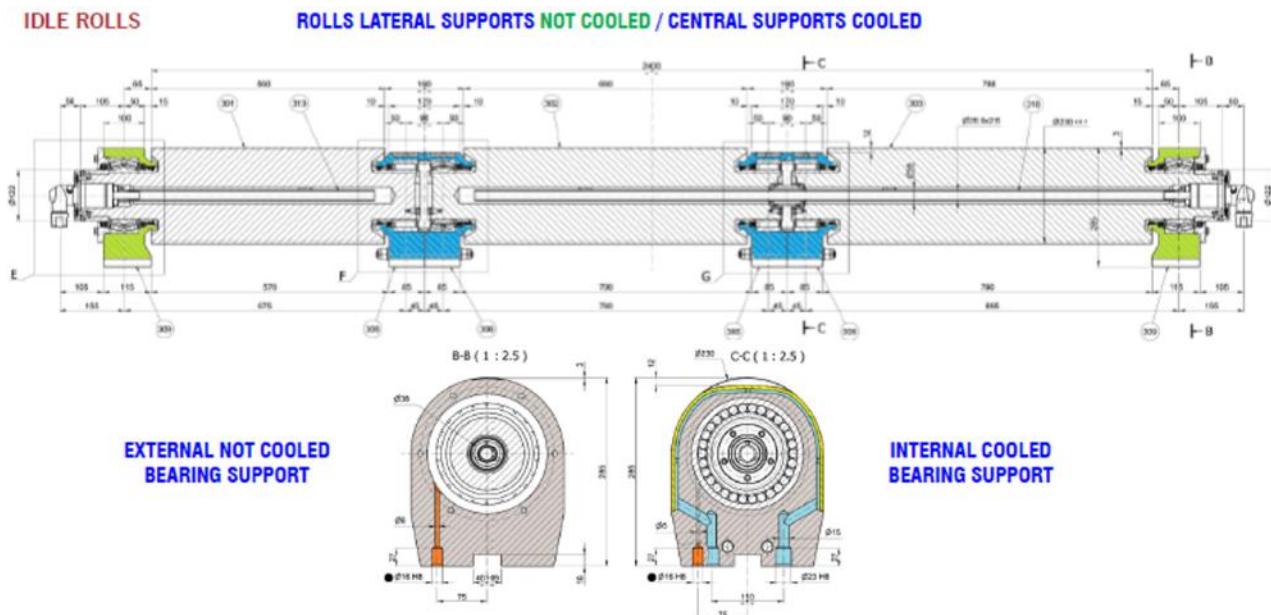


Рисунок 4.39 – Конструкція опорних роликів

Ролик підтримується 4-ма опорами: по дві з кожного боку (зовнішня і внутрішня), при цьому:

Центральні опори охолоджуються (сині — "internal cooled support");

Бокові/зовнішні опори — без охолодження (зелені — "external not cooled support").

Деталі креслення:

Верхнє зображення (поздовжній розріз валу):

Всі 4 опори містять підшипники, які забезпечують обертання ролика;

У внутрішніх опорах передбачені канали для циркуляції охолоджуючої води, щоб уникнути перегріву під час експлуатації;

Охолодження спрямоване на ті зони, де найбільше теплове навантаження — ближче до контакту зі слябом.

Нижня частина (поперечні перерізи):

В-В – поперечний переріз зовнішньої опори (без охолодження);
 С-С – поперечний переріз внутрішньої опори (з каналами охолодження, зображені блакитним).

Переваги такої концепції:

Захист від перегріву внутрішніх опор, які ближчі до гарячої заготовки;

Спрощене обслуговування зовнішніх підшипників;

Оптимальний розподіл навантажень на ролик;

Стабільне обертання завдяки чотирьом точкам опори.

На рисунку 4.40 зображено конструкцію охолодження роликів PDR (Pinch Drive Rollers).

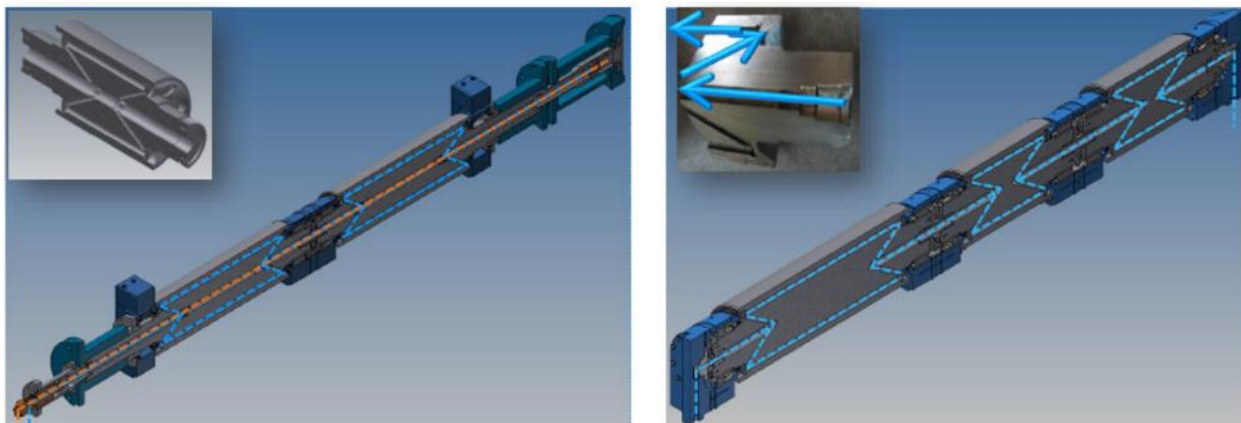


Рисунок 4.40 – Конструкція охолодження роликів

Основні характеристики:

Канали охолодження присутні в центральній та периферичній зоні ролика.

Охолодження послідовне (серійне) — спочатку центральна зона, потім периферична.

Забезпечується безперервне, рівномірне й ефективне охолодження всього ролика.

Ліва частина:

3D-модель розрізу показує:

Вхід води (блакитна стрілка) у центральну частину;

Прохід води по каналах усередині ролика;

Вихід охолоджуючої води після охолодження периферії.

Центр:

Фото з реального виробництва — видно напрям струменя води та подачу через підшипниковий вузол.

Права частина:

Модель демонструє "змійкоподібну" геометрію каналів, яка сприяє кращому охопленню всіх зон ролика;

Це зменшує температурний градієнт і покращує теплову стабільність при експлуатації.

Переваги системи:

Підтримка стабільної температури по всій довжині ролика;

Зниження деформацій ролика від термічного навантаження;

Підвищення довговічності та стійкості до зношування.

На рисунку 4.41 зображено опорну конструкцію сегментів.

Механічна рама з опорами для монтажу сегментів;

Виділено "Water Box" – вузол підведення охолоджуючої води до сегментів;

Спеціальна геометрія забезпечує гнучке кріплення сегментів на криволінійній траєкторії.



Рисунок 4.41 – Опорна конструкція сегментів

Фото по центру:

Реальна опорна конструкція в цеху – видно встановлені точки кріплення сегментів;

Фарбування в зелений колір виділяє елементи кріплення та сервісу.

Фото праворуч:

Вид знизу на всю траєкторію сегментів – від зони кристалізації до роликового столу;

Візуалізує масштабність і складність монтажу всієї лінії сегментів.

Water Box – Вузол підведення охолодження:

Забезпечує розподіл охолоджуючої рідини до форсунок у вторинному охолодженні;

Має декілька відводів для індивідуального підключення кожного сегменту;

Може бути розміщений збоку або знизу рами.

Переваги:

Висока точність монтажу сегментів;

Надійне охолодження через централізоване підведення води;

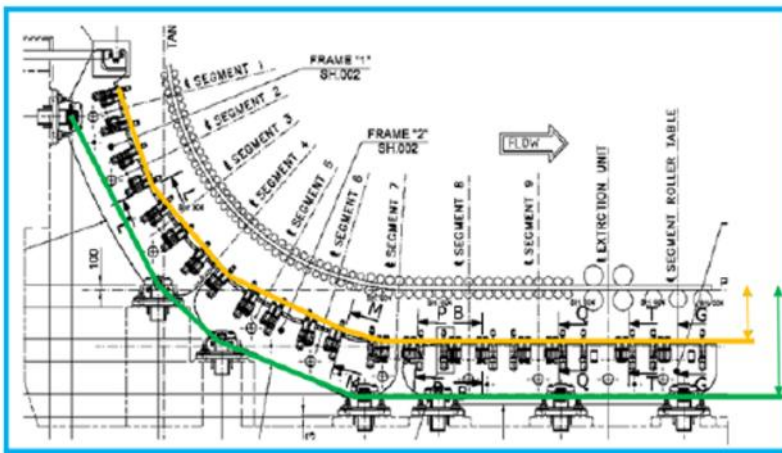
Зручність обслуговування (модульність і доступність вузлів);

Можливість легкого демонтажу/заміни сегментів у разі потреби.

На рисунку 4.42 зображено вирівнювання сегментів машини.

To have the correct alignment between the segments:

- ❖ the distance between the pass line and the support pads must be the same for all the segments
- ❖ the distance between the pass line and the support pins must be the same on adjacent frames



The admissible misalignment between the segments is ± 0.3 mm

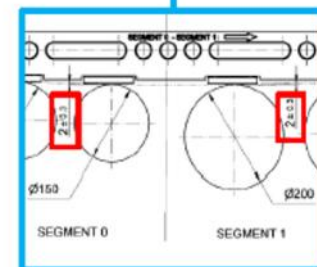


Рисунок 4.42 – Вирівнювання сегментів машини

Основна вимога:

Щоб забезпечити правильне вирівнювання сегментів МБЛЗ, необхідно:

Відстань між лінією проходу (pass line) і опорними майданчиками (support pads) повинна бути однаковою для всіх сегментів.

Відстань між лінією проходу і опорними штифтами (support pins) має бути ідентичною на суміжних рамах.

Допустиме відхилення:

$\pm 0,3$ мм — максимальний допуск на невирівняність між сусідніми сегментами.

Це критично для запобігання зазорам, перекосам і механічному стиранню або пошкодженню заготовки та роликів.

Зображення зліва:

Показано встановлення сегментів уздовж криволінійної траєкторії;

Жовта і зелена лінії ілюструють лінії проходу та базові рівні;

Розміщення сегментів (А до І) показано в контексті монтажу на фрейми (рамки).

Фрагмент справа:

Вказано місце контролю допусків між сегментами;

Обидва сегменти повинні забезпечувати безперервність роликів шляху без зсувів, як показано з вимірюванням 224,2 / 224,3 мм.

На рисунку 4.43 зображено направляючі для вилучення сегментів.

SEGMENT EXTRACTION GUIDES

For the quick replacement of the segment, and due to their position along the caster, a set of extraction guides allow an easy replacement of the segments with a special wheeled extraction chain.

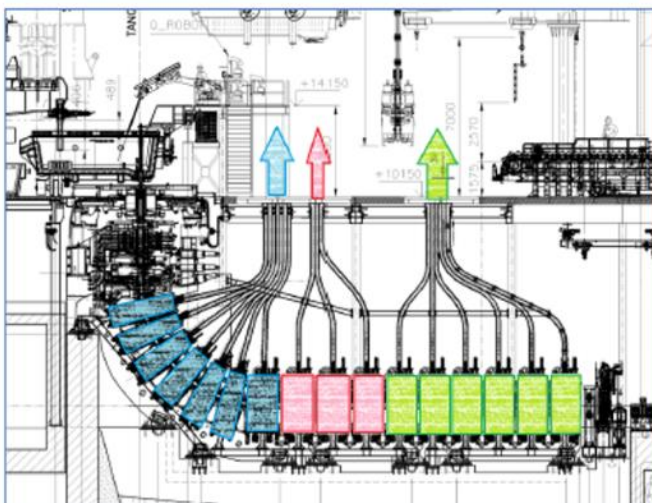


Рисунок 4.43 – Направляючі для вилучення сегментів

Компоненти та логіка роботи:

Ліве зображення (технічна схема):

Виділені кольором сегменти (синій, рожевий, зелений) показують різні позиції:

Сегменти на дуговій частині;

Прямі сегменти в середній зоні;

Сегменти нижньої прямої частини.

Стрілки (вгору) вказують напрямки підйому сегментів при демонтажі.

Середнє фото:

Реальне зображення частини МБЛЗ із напрямними та трубопроводами.

Видно щільну сітку водяних з'єднань, що підключені до кожного сегмента.

Праве фото:

Процес вилучення сегмента за допомогою жовтої знімальної рамки, яка під'єднується до сегмента і підіймає його краном вгору.

Переваги такої системи:

Мінімізація простоїв — швидкий доступ до будь-якого сегмента;

Зручність у ремонті та інспекції;

Немає потреби демонтувати всі сегменти послідовно — доступ до кожного сегмента індивідуальний;

Підвищення безпеки обслуговування.

На рисунку 4.44 зображено LPC – Solidification Model від компанії Danieli, який використовується в процесі безперервного лиття сталі для управління вторинним охолодженням і зазором між сегментами.

Secondary Cooling and Segment Gap are controlled by L2 through the use of a mathematical model of the continuous casting process (thermal model).

The model predicts the temperature and the growth of the solidifying steel shell along the machine length and is based on the travelling slice concept.

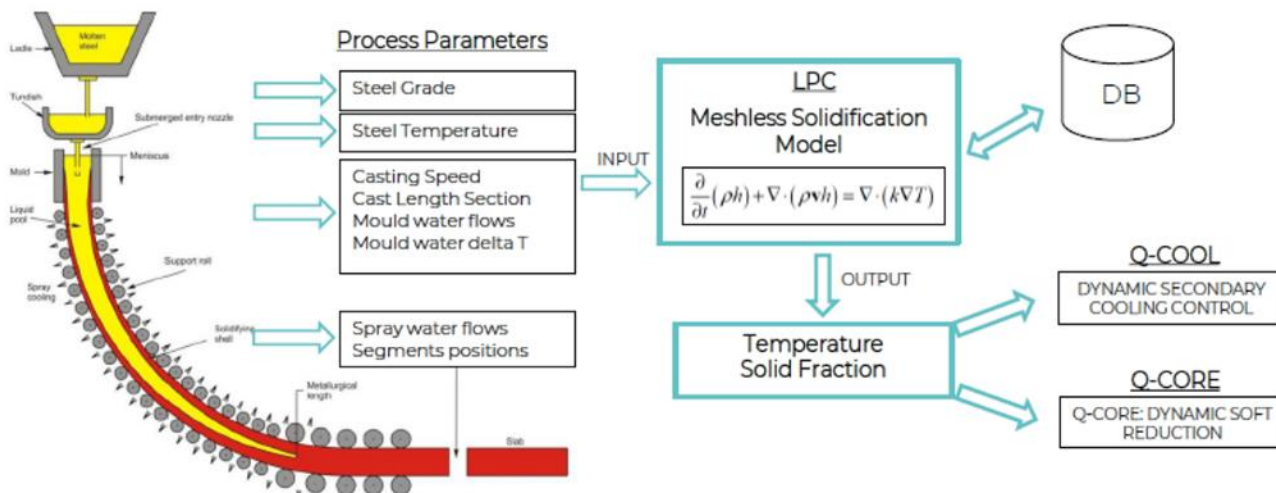


Рисунок 4.44 LPC – Solidification Model від компанії Danieli

LPC – Модель тверднення сталі (Q-COOL & Q-CORE)

Модель LPC (meshless solidification model) застосовується в системі рівня L2 (Level 2 Automation), щоб:

Прогнозувати температуру і зріст твердої оболонки уздовж довжини машини;

Оптимізувати динамічне вторинне охолодження (Q-COOL);

Забезпечити динамічне м'яке обтиснення (Q-CORE).

Логіка роботи системи:

Вхідні параметри:

Марка сталі

Температура сталі

Швидкість лиття, довжина заготовки, витрати води в кристалізаторі, дельта температури

Витрати води у зонах розпилу

Позиції сегментів

Ці параметри подаються у модель LPC, яка використовує рівняння теплопереносу для розрахунку температурного поля.

Вихідні дані:

Температура в кожній точці злитка

Фракція твердого стану (Solid Fraction)

Взаємодія з системами:

Q-COOL – система динамічного керування вторинним охолодженням відповідно до реального стану тверднення.

Q-CORE – система динамічного м'якого обтиснення (Soft Reduction) з урахуванням залишкової рідкої зони.

Ключовий підхід:

Модель ґрунтується на концепції "travelling slice" – переміщення тонкого шару сталі крізь усі зони, що дозволяє точно передбачити стан тверднення в реальному часі.

На рисунку 4.45 зображено систему Q-COOL — динамічного керування вторинним охолодженням в установці безперервного лиття заготовок.

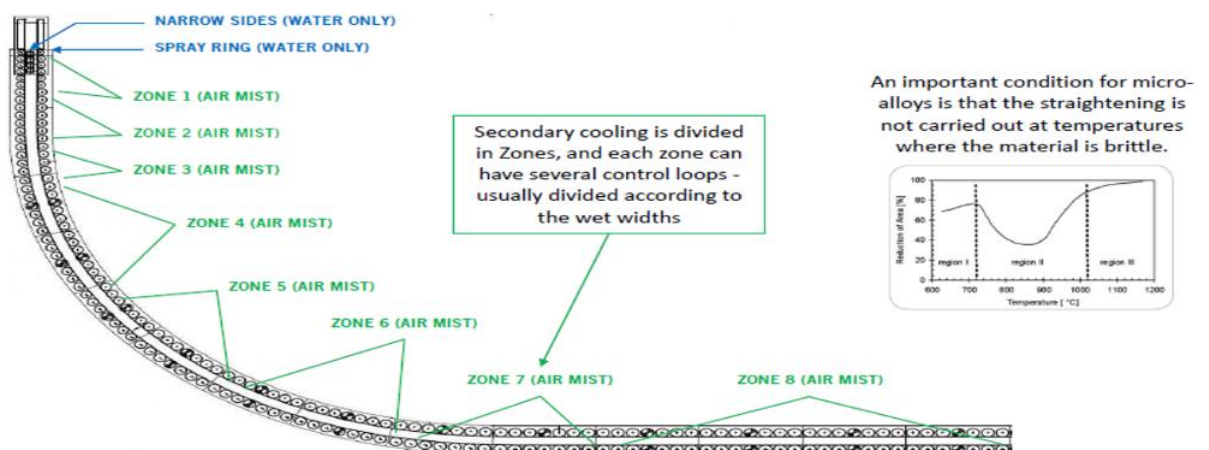


Рисунок 4.45 систему Q-COOL динамічного керування вторинним охолодженням в установці безперервного лиття заготовок

Принцип дії:

Вторинне охолодження поділене на зони (Zone 1–8). Кожна зона може мати кілька незалежних контурів керування, які зазвичай відповідають різній ширині зрошення (wet widths).

Зони охолодження:

ZONE 1–8: Використовують повітряно-водяний туман (AIR MIST) — ефективне та контрольоване охолодження для запобігання термічним напруженням і тріщинам.

NARROW SIDES та SPRAY RING:

Тільки вода, для рівномірного охолодження вузьких сторін заготовки.

Важлива умова:

Для мікролегованих сталей випрямлення заготовки не повинно відбуватися при температурах, за яких матеріал є крихким.

На графіку справа видно "регіон II", де температура $\sim 700\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ — зона знижених пластичних властивостей. Уникання деформації в цій зоні критично важливе.

Мета системи:

Забезпечити точне охолодження згідно з розрахунковою температурною моделлю (LPC);

Гарантувати, що випрямлення відбувається після зони крихкості (зазвичай при температурі $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$);

Уникнути поверхневих і внутрішніх дефектів (тріщин, напружень).

4.4 Зона транспортування та відвантаження DISCHARGE AREA:

Roller Table (Роликовий стіл) На рисунку 4.46 зображено роликовий стіл.

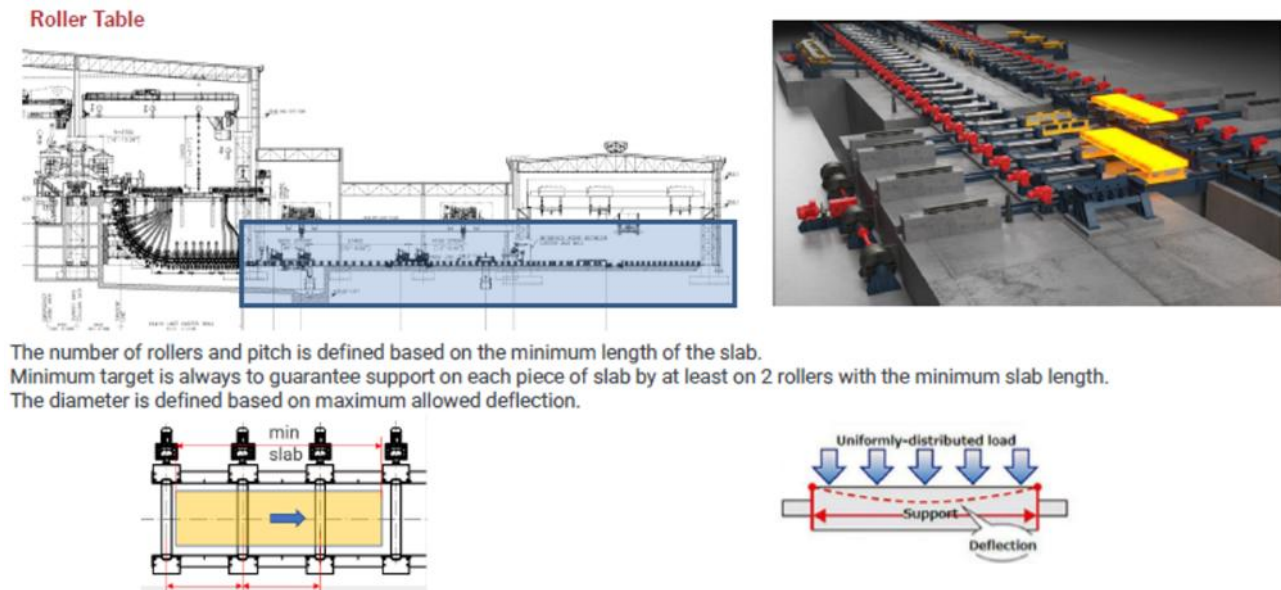


Рисунок 4.46. - Роликовий стіл

DISCHARGE AREA: Roller Table (Роликовий стіл)

Основна мета:

Забезпечити надійну опору кожної сляби мінімальної довжини на щонайменше 2 роликах одночасно.

Ключові конструктивні параметри:

Крок (pitch) і кількість роликів визначаються на основі мінімальної довжини сляби.

Діаметр ролика підбирається з урахуванням допустимого прогину (deflection) під дією розподіленого навантаження.

Схема внизу зліва: Показує, що навіть найкоротша сляба повинна опиратися щонайменше на 2 ролики.

Графіка праворуч унизу: Ілюструє, як однорідне навантаження призводить до прогину між опорами, тому правильне розміщення роликів критичне для уникнення деформацій.

Фотографія праворуч угорі: Візуалізація реального роликового столу з слябами, які транспортуються в зону охолодження/різання/накопичення.

Призначення роликового столу:

Плавне транспортування сляби до зони різання/охолодження.

Зменшення механічних напружень у гарячому продукті.

Запобігання механічним ушкодженням під час переміщення.

На рисунку 4.47 зображено маятникові ножиці (PENDULUM SHEAR)

PENDULUM SHEAR

For THIN slab, after the segments area, to cut the final slab, the pendulum shear is used to cut the slab (blade cut). It can performs cut to length, sample cutting, chopping, emergency cut.

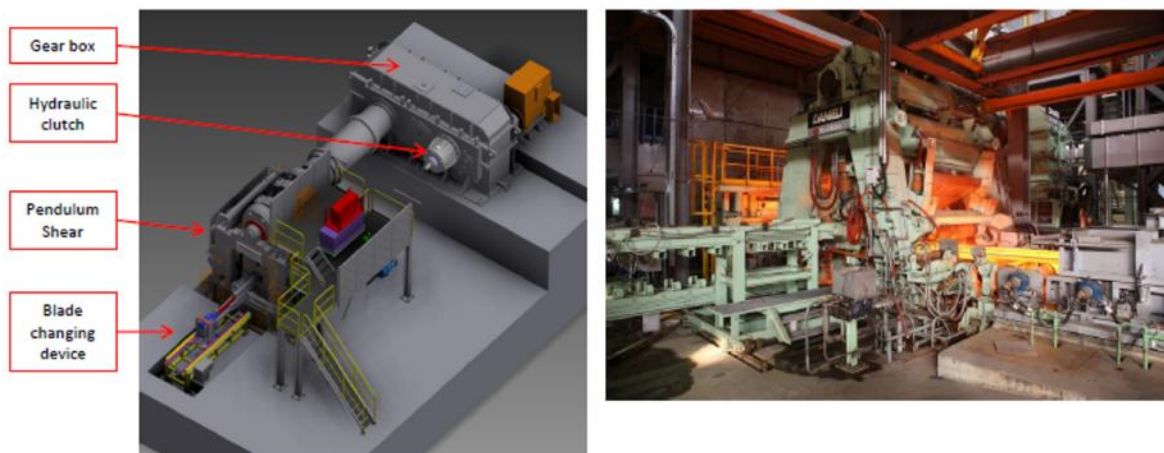


Рисунок 4.47. Маятникові ножиці (PENDULUM SHEAR)

PENDULUM SHEAR — маятникові ножиці

Механізм різання слябів після виходу з сегментної зони. Здійснює різання лезом (blade cut) в таких режимах:

Різання на довжину (cut-to-length)

Контрольне/вибіркове різання (sample cutting)

Аварійне різання (emergency cut)

Секційне різання / дроблення (chopping)

Основні компоненти (зліва на схемі):

Gear box — редуктор (передає крутний момент)

Hydraulic clutch — гідравлічна муфта (вмикає/вимикає передачу моменту)

Pendulum Shear — маятниковий ріжучий блок (головний механізм різання)

Blade changing device — пристрій зміни ножів (забезпечує швидку та безпечну заміну леза)

Фото праворуч:

Реальний вигляд маятникових ножиць на ділянці перед подачею слябів на охолодження або транспорт.

Переваги маятникових ножиць:

Висока швидкість і точність різання

Придатність для гарячої сляби

Автоматична зміна ножів для підвищення безпеки й продуктивності

На рисунку 4.48 зображено конструкцію маятникових ножиць (Pendulum Shear Structure).

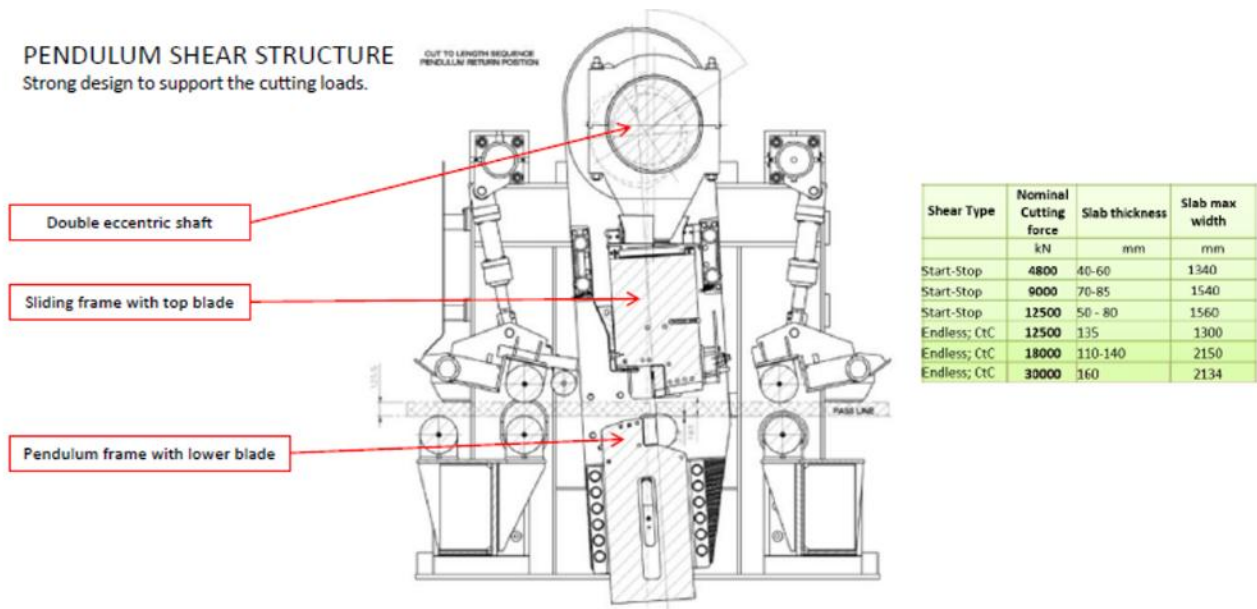


Рисунок 4.48 – Конструкція маятникових ножиць (Pendulum Shear Structure)

Основні конструкційні елементи (позначені стрілками):

Double eccentric shaft — подвійний ексцентриковий вал
Забезпечує маятниковий рух ріжучої рами (циклічне підняття/опускання ножа)

Sliding frame with top blade — рухома рама з верхнім ножем
Верхній різальний елемент, який опускається під час різання

Pendulum frame with lower blade — маятникова рама з нижнім ножем

Стационарний або менш рухомий ніж, що утворює ріжучу пару. Характеристики ножиць зображено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.4. Характеристики ножиць.

Тип ножиць	Зусилля рі- зання (кН)	Товщина сляба (мм)	Макс. ширина сляба (мм)
Старт-Стоп	4800	40–60	1340
Старт-Стоп	9000	70–85	1540
Старт-Стоп	12500	50–80	1560
Безперервне різання coil-to-coil	12500	135	1300
Безперервне різання coil-to-coil	18000	110–140	2150
Безперервне різання coil-to-coil	30000	160	2134

Міцна жорстка конструкція ножиць дозволяє витримувати великі навантаження при різанні гарячих слябів із товщиною до 160 мм і шириною понад 2 м.

На рисунку 4.49 зображено кінематичний принцип роботи маятникових ножиць.

PENDULUM SHEAR PRINCIPLE

In the cinematic of the pendulum shear the double eccentric shaft with one full rotation will close and open the two blades: bottom blade on the pendulum frame and top blade on top sliding frame.

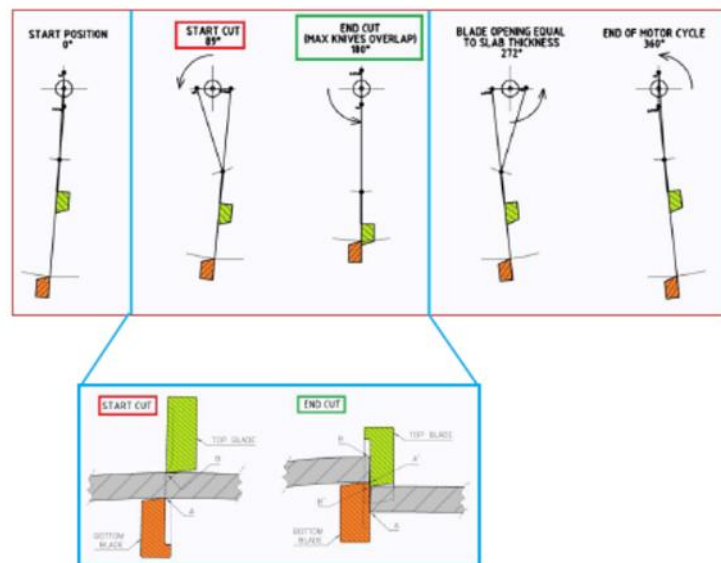
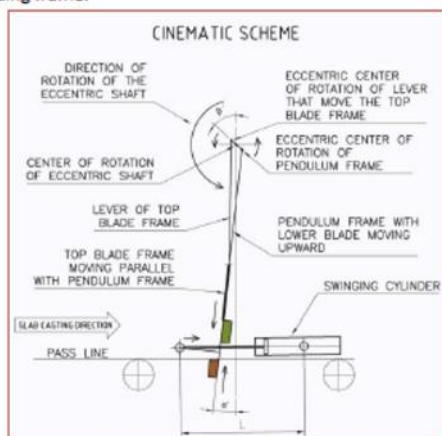


Рисунок 4.49. Кінематичний принцип роботи маятникових ножиць

Подвійний ексцентриковий вал (eccentric shaft), здійснюючи один повний оберт (360°), забезпечує:

Закриття ножиць: ріжучі леза перекриваються та ріжуть сляб

Відкриття ножиць: леза повертаються у вихідне положення

Схема кінематики (ліворуч):

Eccentric shaft — обертається і приводить у дію обидва ножі.

Top blade frame — верхній ніж рухається разом із маятниковим механізмом.

Pendulum frame with lower blade — нижній ніж закріплений на маятниковій рамі, яка піднімається.

Swinging cylinder — створює маятниковий рух усього механізму.

Центри обертання: кожна частина має власну вісь обертання.

Фази циклу ножиць (справа зображено в таблиці 4.4).

Таблиця 4.5. Фази циклу ножиць.

Етап	Опис
Start position (0°)	Початкова вертикальна позиція
Start cut (89°)	Початок різання — ножі зближуються
End cut (180°)	Максимальне перекриття ножів — завершення різання
Blade opening (270°)	Ножі відкриті на товщину сляба
End of cycle (360°)	Повернення у вихідне положення

Детальна схема різу (внизу справа):

Start Cut: верхній ніж починає занурення в сляб

End Cut: ножі повністю перекриваються, завершуючи різ

Цей принцип дозволяє:

Виконувати точний розкрій по довжині

Здійснювати аварійне різання

Забезпечити високу надійність при роботі з гарячими слябами великої товщини

На рисунку 4.50 зображено машину газополуменевого різання (Torch Cutting Machine).

TORCH CUTTING MACHINE

For CONVENTIONAL slab, after the segments area, to cut the final slab, the torch cutting machine is installed on a trolley that moves at the casting speed and 2 synchronized torches cut simultaneously the slab from the external side. To avoid damaging the below rolls of the roller table, these rolls can be shifted or tilting ("ducking").

In the DUCKING ROLLER TABLE, the roll approaching the cut flame is tilted down and pass the cutting line without interrupt the cutting cycle.

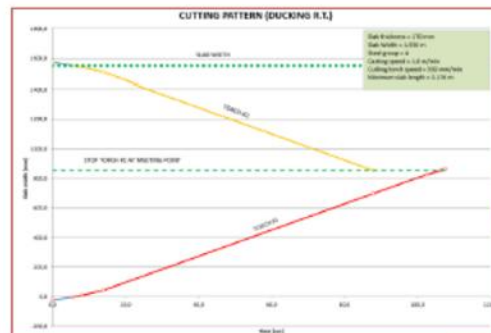
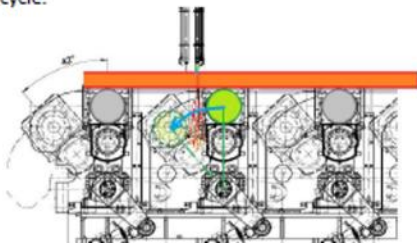


Рисунок 4.50 – Машина газополуменевого різання

Технічна реалізація:

2 синхронізовані різаківі головки встановлюються на каретці, що рухається зі швидкістю лиття.

Різаки розташовані по обидва боки сляба, забезпечуючи симетричне різання.

Ducking Roller Table — Стіл з опускаючимися роликами:

Щоб не пошкодити ролики під слябом, ті ролики, які потрапляють у зону різання, можуть нахилитись або зсуватись вниз ("ducking").

Це дозволяє не зупиняти процес різання, навіть коли ролик опиняється в лінії полум'я.

Графік (угорі праворуч):

Показує патерн різання:

Жовта лінія — ширина сляба.

Червона лінія — траєкторія руху різача.

Зелена точка — момент повної зупинки ролика.

Рух різача синхронізований із швидкістю лиття та положенням сляба.

Фото та схема:

Фото праворуч — реальна машина з двома різачами, що працюють на гарячому слябі.

Нижня схема — механізм нахилу ролика для уникнення контакту з різачом.

Основні переваги:

Безперервний цикл різання

Висока точність

Відсутність пошкоджень роликів

Автоматизація процесу розкрою

На рисунку 4.51 зображено стіл зсувного типу (Shifting Roller Table).

Цей слайд ілюструє один з ключових елементів роботи машини газокисневого різання — "стіл зсувного типу" (Shifting Roller Table). Він потрібен для того, щоб:

SHIFTING ROLLER TABLE

In the shifting roller table, when the torches approach one roll, the full roller table is shifted quickly below the torch cutting with a short interruption of the cutting cycle (roll jump) to avoid damaging of the roll.

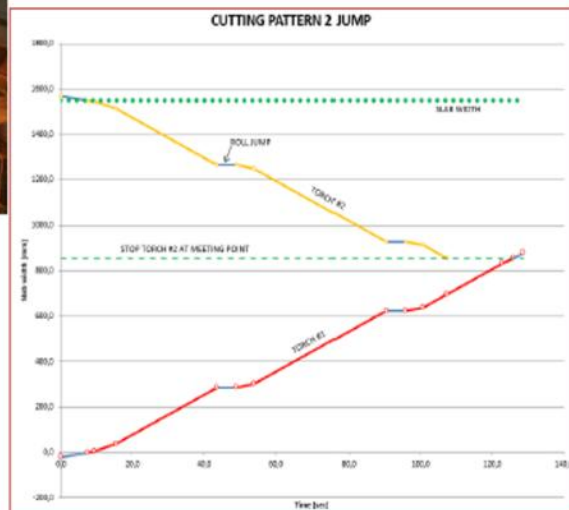
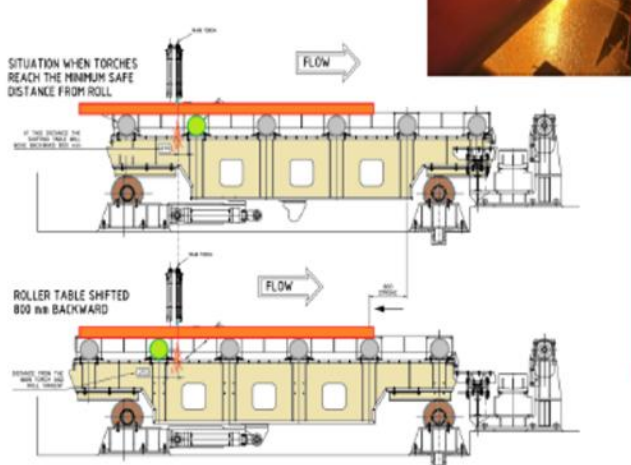


Рисунок 4.51. Стіл зсувного типу

Уникнути пошкодження роликів під час різання, коли ріжучий факел наближається до ролика на мінімально безпечну відстань.

У відповідний момент весь стіл зміщується назад (наприклад, на 800 мм) — завдяки цьому різання продовжується, але ролик опиняється в іншому положенні, і його не зачіпає полум'я.

На графіку праворуч показано, як рухаються обидва пальники (Torch #1 і Torch #2), і як траєкторія одного з них змінюється під час "roll jump".

На рисунку 4.52 зображено машину для видалення задирок (Deburring Machine), що встановлюється в зоні після різання — маятникового або газокисневого.

DEBURRING MACHINE – HAMMER TYPE

After the cutting machine, to remove the burrs on the head and on the tail of the slab before the mill.

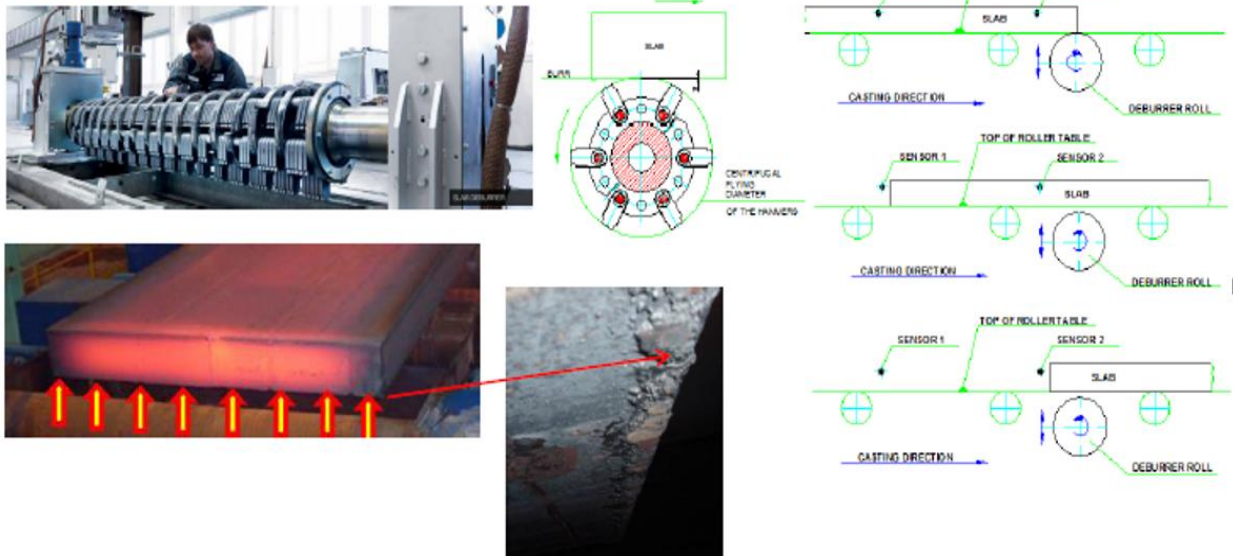


Рисунок 4.52 – Машина для видалення задирок (Deburring Machine)

Призначення:

Видаляє задирки (бури) з торців заготовки — як з голови, так і з хвоста. Забезпечує чисту поверхню перед подачею до прокатного стану. Виключає пошкодження валків і інструменту на прокатці.

Як працює:

У центрі обертається вал із радіально встановленими молотками, які розганяються до високої швидкості за рахунок відцентрової сили. Під час проходження сляба, молотки ударяють по торцях, збиваючи нерівності та застигли металеві нашарування. Положення сляба визначають сенсори (Sensor 1, Sensor 2), які активують систему у правильний момент.

Причини появи задирок:

Внаслідок різання маятниковими ножицями або газокисневим різанням на торцях можуть залишатися нерівності, патьоки металу, що затверділи.

Якщо їх не зняти, це може призвести до дефектів прокату або пошкодження прокатного інструменту.

Порівняння маятникових ножиць та машини газокисневого різання зображено в таблиці 4.6.

Табл. 4.6. Порівняння маятникових ножиць.

Критерій	Маятникові ножиці (Pendulum Shear)	Газокисневе різання (Torch Cutting Machine)
Тип слябів	Тонкі сляби (Thin Slab)	Товсті сляби (Conventional Slab)
Товщина сляба	40–160 мм (типово 50–110 мм)	110–300 мм
Метод розкрою	Механічний зріз за допомогою двох лез	Термічне (газо-кисневе) різання двома пальниками
Швидкість процесу	Дуже висока (миттєве різання, до 60–70 слябів/год)	Нижча (обмежена швидкістю плавлення та подачі газу)
Точність розрізу	Висока, з мінімальною деформацією	Помірна; можливе оплавлення, шлак, потреба в подальшій обробці
Вплив на якість поверхні	Мінімальний	Є зони термічного впливу (HAZ), окалина, оплавлення
Зусилля/енергія	Високі механічні зусилля (до 30 000 кН)	Газ + кисень, витрати на паливо
Обладнання	Привід з подвійним ексцентриком, леза, гідропривод	Візок з пальниками, система синхронізації зі швидкістю лиття
Переваги	Швидкість	
Тип МБЛЗ	Тонкослябова (ESP, ISP, QSP, mini mill)	Стандартна товстослябова МБЛЗ
Додаткові функції	Може виконувати різання на довжину, відбір зразків, аварійне різання	Автоматичне різання по шаблону, можливість зупинки візка

Висновок:

Маятникові ножиці — оптимальні для високошвидкісного, компактного виробництва тонких слябів (типово до 160 мм).

Газокисневе різання — універсальне рішення для товстих слябів, де потрібна гнучкість і адаптація до змінної геометрії виробу.

На рисунку 4.53 зображено автоматичну систему візуального контролю поверхні заготовки.

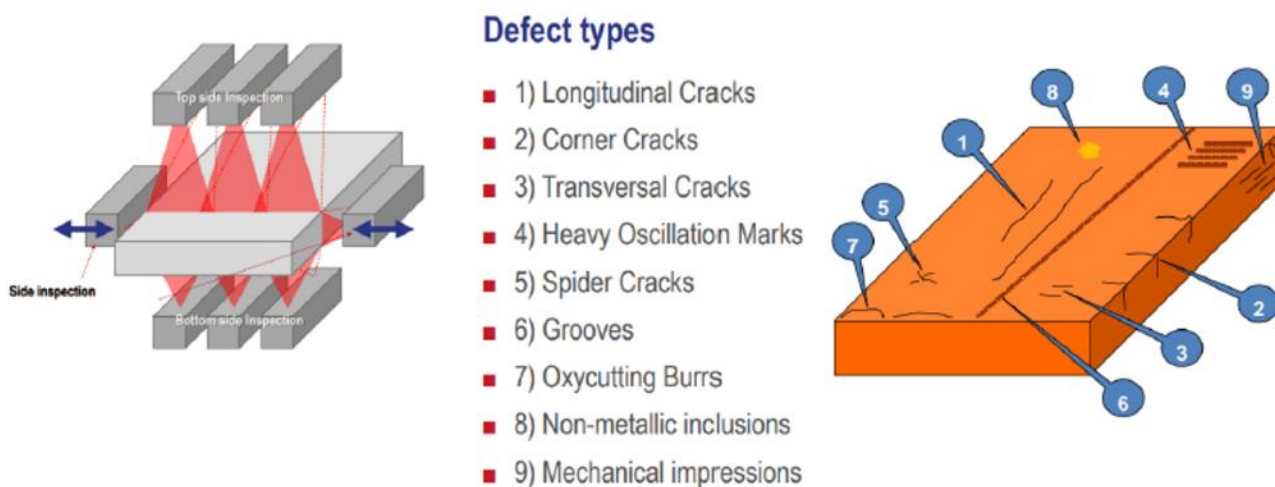


Рисунок 4.53. Автоматична система візуального контролю поверхні заготовки

Що робить система Surface Inspection?

Сканує верхню, нижню та бокові поверхні сляба (як видно на схемі зліва).

Виявляє дефекти в режимі реального часу за допомогою оптичних камер і алгоритмів розпізнавання дефектів.

Передає дані в систему керування для прийняття рішень: дефектування, маркування, перенаправлення або відбракування.

Основні типи дефектів зображено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Основні типи дефектів.

№	Назва	Пояснення
1	Поздовжні тріщини (Longitudinal Cracks)	Вздовж напрямку лиття – часто через термічні напруження
2	Кутові тріщини (Corner Cracks)	Утворюються на ребрах через несиметричне охолодження
3	Поперечні тріщини (Transversal Cracks)	Перпендикулярні до напрямку лиття – можуть вказувати на проблеми з сегментами або вторинним охолодженням
4	Глибокі сліди коливань (Heavy Oscillation Marks)	Відбитки коливань кристалізатора – ознака нестабільної роботи
5	Павутинні тріщини (Spider Cracks)	Мережа дрібних тріщин через перегрів або забруднення
6	Канавки (Grooves)	Борозни, спричинені механічним зносом або пошкодженням направляючих
7	Забриси від різання (Oxycutting Burrs)	Нерівності після факельного різання
8	Неметалеві включення (Non-metallic inclusions)	Шлаки, оксиди або інші домішки, що не розплавився
9	Механічні вм'ятини (Mechanical Impressions)	Сліди контакту з обладнанням – ролики, направляючі тощо

Ця система є важливою складовою цифрового контролю якості сталі ще до її подальшої обробки:

Виявлення дефектів до прокатки → зниження браку.

Інтеграція з маркувальними або сортувальними станціями.

Класифікація слябів за якістю (A/B/C).

Зменшення людського фактора в контролі.

На рисунку 4.54 зображено аналітичну карту причин поверхневих дефектів.

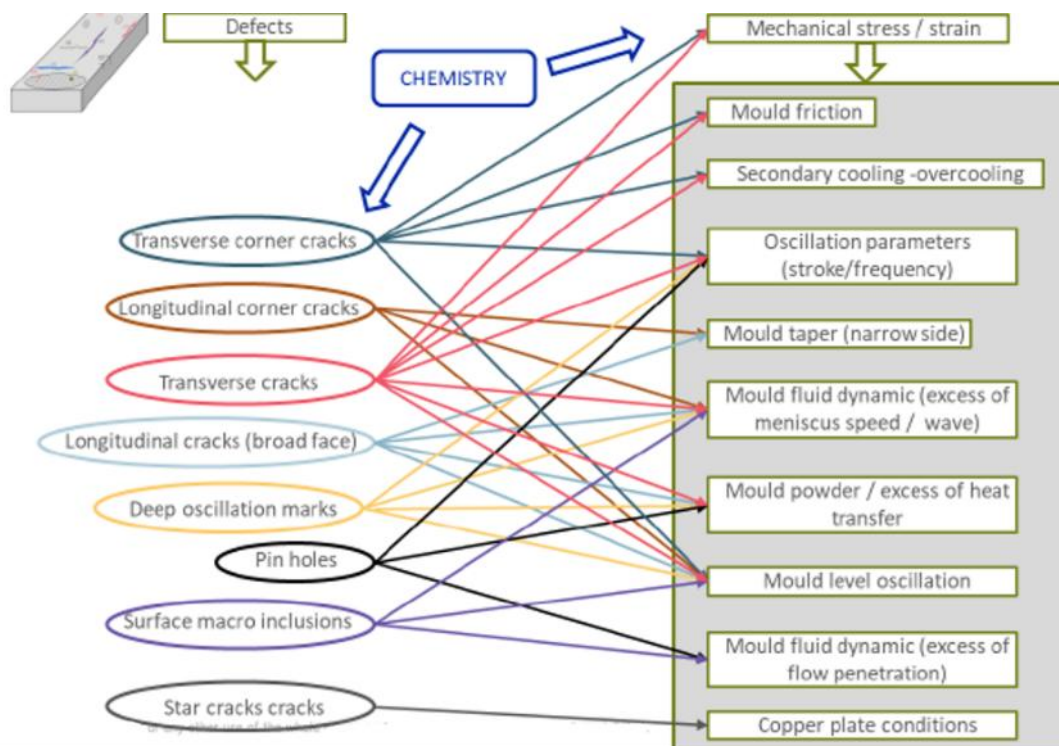


Рисунок 4.54. Аналітична карта дефектів.

Технічні параметри зображено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Технічні параметри

Mould friction	Тертя у кристалізаторі
Secondary cooling – overcooling	Надмірне охолодження у вторинному охолодженні
Oscillation parameters	Параметри коливань (частота/амплітуда)
Mould taper	Конусність кристалізатора (звуження вузької сторони)
Mould powder / heat transfer	Шлак кристалізатора / передача тепла
Copper plate conditions	Стан мідних плит кристалізатора
Fluid dynamic (meniscus / penetration)	Гідродинаміка металу (меніск / проникнення)

Типові дефекти литих слябів та чинники їх виникнення

Transverse corner cracks

Поперечні тріщини у кутах

Причини:

Mould friction – тертя в кристалізаторі

Secondary cooling overcooling – надмірне охолодження у вторинному охолодженні

Mould taper – неправильне звуження форми (кристалізатора)

Mould powder – частки зносу кристалізатора, що спричиняють порушення тепловідведення.

Chemistry – хімічний склад сталі (чутливий)

Longitudinal cracks (broad face)

Поздовжні тріщини на широкій стороні заготовки

Причини:

Mould level oscillation – коливання рівня металу в кристалізаторі

Excess of flow penetration – надмірне проникнення потоку металу

Mould powder – шлак кристалізатора

Mould friction – тертя в кристалізаторі

Oscillation parameters – параметри коливань

Star cracks

Зіркоподібні тріщини

Причини:

Copper plate conditions – стан мідних пластин кристалізатора

Mould powder – шлак кристалізатора

Chemistry – хімічний склад сталі

Маркувальна машина.

Порошкове маркування – найпоширеніше та найекономічніше рішення, діапазон температур маркування: 1200–500 °С (нижче 500 °С порошок погано прилипає).

Фарбове маркування – застосовується переважно для холодного матеріалу та коли сляби зберігаються в умовах, захищених від атмосферного впливу; температурний діапазон: 0–500 °С.

Маркування дротом – використовується, коли сляби проходять інтенсивне охолодження у водяних ямах.

Маркування етикетками – застосовується, коли вироби мають невеликий переріз і потребують точного маркування.

Пробивне маркування – альтернатива етикетуванню з метою зменшення витрат: замість етикетки створюється QR-код шляхом пробивання.

На рисунку 4.55 зображено маркувальну машину.



Рисунок 4.55 - Маркувальна машина

На рисунку 4.56 зображено приклад маркування.



Рисунок 4.56 – Приклад маркування : штрих-код та нанесення порошку

4.5. Технологічна частина

1.1. Установлення сталеплавильного ковша

Після подачі з конвертерного або електросталеплавильного цеху сталеплавильний ківш установлюється на підйомно-поворотний стенд (ladle turret), який забезпечує надійну фіксацію та можливість обертання навколо осі. Привід стенда дозволяє обертати ківш у вертикальній площині, точно виводячи його у робоче положення над проміжним ковшем.

Перед початком розливу кришка ковша автоматично знімається за допомогою маніпуляторного пристрою, що дає доступ до отвору для зливу сталі.

Після відкриття ківш позиціонується з високою точністю над проміжним ковшем за допомогою обертової рами, яка синхронізована з автоматизованою системою контролю. Це забезпечує правильне розташування вихідного отвору ковша відносно захисної труби (ladle shroud) і мінімізує ризик зміщення потоку сталі при розливі.

1.2. Підключення ковш – проміжний ківш

Після точного позиціонування ковша над проміжним ковшем здійснюється підключення захисної труби (Ladle Shroud), яка герметично з'єднує вихідний отвір ковша з приймальним отвором проміжного ковша.

Ця труба служить бар'єром від потрапляння кисню з атмосфери, забезпечуючи безперервний і контрольований потік сталі у захищеному середовищі.

Одночасно з підключенням активується подача інертного газу – аргону, який подається як по периметру труби, так і в сам проміжний ківш. Це створює газову завісу, яка запобігає окисненню струменя сталі при контакті з повітрям, знижує втрати легувальних елементів і сприяє підвищенню якості заготовки.

Для запобігання потраплянню шлаку до проміжного ковша під час завершення зливу сталі вмикається система виявлення шлаку. Оптичні або електромагнітні датчики встановлені на ковші фіксують зміну властивостей струменя (щільність, світіння, в'язкість) і автоматично сигналізують про момент переходу від сталі до шлаку, дозволяючи оператору або системі зупинити злив і запобігти забрудненню.

2. Розлив у проміжний ківш

2.1. подача сталі

Рідка сталь надходить з ковша у проміжний ківш через стопорний механізм, який складається зі стопорного стержня (stopper rod) і внутрішнього каналу з підводною трубою (SEN — submerged entry nozzle). Стопорний стержень виконує функцію регулювання витрати: шляхом підняття або опускання він відкриває або перекриває канал подачі сталі, забезпечуючи точний контроль швидкості розливу та стабільності потоку до кристалізатора.

2.2. Очищення та контроль якості

З метою очищення металу від неметалевих включень у дні проміжного ковша передбачено продувку аргоном. Аргон подається через пористі вставки або спеціальні газові канали, створюючи висхідний потік дрібних бульбашок, які захоплюють і виносять шлакові або оксидні включення на поверхню.

Всередині проміжного ковша встановлені дамби (dams) або перегородки, які керують напрямком потоку сталі та запобігають прямому перетоку шлаку до зони SEN. Це дозволяє знизити ризик шлакового забруднення кристалізатора та покращує гомогенність температури і хімічного складу сталі.

3. Подача сталі у кристалізатор

3.1. Початок кристалізації

Розплавлена сталь із проміжного ковша подається до мідного кристалізатора через занурену трубу (SEN – Submerged Entry Nozzle), що забезпечує спокійний, контрольований потік без турбулентності та окиснення.

Для підтримання стабільності процесу встановлено датчики рівня меніска сталі – ультразвукові, вихрострумові або лазерні (система Q-Level), які в реальному часі відстежують положення металевої поверхні в кристалізаторі. Це дозволяє системі автоматично регулювати витрату сталі через стопорний механізм.

Осцилятор кристалізатора виконує вертикальні коливання форми за заданою амплітудою та частотою. Реалізується один із режимів осциляції — positive або negative strip, які впливають на характер змащення та формування первинної оболонки зливка.

3.2. Геометрія зливка

Ширина зливка регулюється за рахунок вузьких бокових плит (narrow faces), які оснащені гідравлічними або електромеханічними приводами. Це дає змогу змінювати ширину сляба в режимі online, залежно від замовлень або умов прокатного виробництва.

Під час осциляції в кристалізатор автоматично подається спеціальний порошок (mould powder), що плавиться на поверхні сталі. Цей шар виконує мастильну, теплоізоляційну та антиокисну функції, знижуючи тертя між зливком і стінками кристалізатора та зменшуючи кількість поверхневих дефектів.

4. Первинне формування оболонки

У кристалізаторі, внаслідок інтенсивного охолодження мідними стінками, починається формування первинної твердої оболонки зливка. Цей процес є критично важливим, адже саме тут формується геометрія та початкові властивості майбутньої заготовки.

Для покращення внутрішньої структури металу застосовується система електромагнітного перемішування сталі (EMBr або MM-EMS). Вона створює контрольоване магнітне поле навколо рідкого ядра, яке викликає вихрові потоки у ванні сталі, забезпечуючи гомогенізацію температури, розподілу легувальних елементів і зменшення включень.

Додатково працює система Q-MAP, яка в режимі реального часу здійснює моніторинг температури мідних плит кристалізатора за допомогою вбудованих датчиків. Це дозволяє:

своєчасно виявляти перегриви або недогриви,

фіксувати аномалії типу холодних плям (cold spots) або прилипів металу до стінок,

підвищити надійність роботи осцилятора та зменшити ризик пробоїв оболонки.

Таким чином, у кристалізаторі закладається основа якості заготовки, яка потім розвивається в процесі вторинного охолодження та обтиснення.

5. Вторинне охолодження та витягування

5.1. Затравка (Dummy Bar)

Перед початком розливу в машину безперервного лиття заготовок вводиться затравка — спеціальний металевий стрижень або профіль, який імітує тверду оболонку зливка. Її головна функція — забезпечити безперервне витягування рідкої сталі, що кристалізується, з кристалізатора у зону вторинного охолодження.

Затравка може подаватися зверху (з боку кристалізатора) або знизу з накопичувального пристрою (Dummy Bar Storage), залежно від конструкції МБЛЗ.

Коли розплавлена сталь починає заповнювати кристалізатор, затравка захоплюється приводними витяжними роликками на виході з секції, і таким чином тягне за собою формовану заготовку, поки вона не набуде необхідної довжини та жорсткості для самостійного витягування.

Після завершення розливу затравка від'єднується та повертається у накопичувач для повторного використання в наступному циклі. Вона відіграє ключову роль у стабільності запуску розливу та безпеці процесу.

5.2. Сегментна зона

Після виходу з кристалізатора заготовка потрапляє у сегментну зону — багаторівневу конструкцію з послідовно розташованих секцій з

роликами (сегментів), які виконують підтримку, направлення та витягання зливка по заданій траєкторії.

У кожному сегменті встановлено ролики з водяним або повітряно-водяним охолодженням, що перешкоджає їх перегріву при контакті з гарячим металом. Між сегментами розташовані форсунки системи вторинного охолодження, які подають розпилену воду на поверхню зливка для інтенсивного охолодження й формування повністю твердої оболонки.

У зоні завершення кристалізації працює система Soft Reduction (Q-Core) — кероване обтиснення зливка в твердо-рідкій фазі. Вона компенсує усадку під час затвердіння і зменшує ризик утворення центральної усадкової порожнини, покращуючи щільність і якість серцевини заготовки.

Для оптимізації структури металу в центральній зоні заготовки використовується електромагнітне перемішування типу In-Roll EMS (IR-EMS), розташоване всередині сегментів між роликами. IR-EMS створює керовані вихрові потоки в серцевині рідкого ядра, що сприяє вирівнюванню температурного поля та мікроструктури, зменшенню макросегрегації й дефектів типу «центр пустий».

6. Різання та зачистка

Після проходження сегментної зони затверділа заготовка надходить у зону різання, де виконується її поділ на заготовки необхідної довжини.

Перше різання здійснюється маятниковими ножицями або газокисневим різанням — залежно від товщини та температури сталі. Воно дозволяє відокремити зливки від затравки або виконати початковий поділ на крупні секції.

Друге різання (фінішне) виконує обрізку кінців, вирівнює торці та точно калібрує довжину заготовок відповідно до вимог замовника. Для цього застосовуються високоточні ножиці або різак з ЧПК.

Після різання проводиться зачистка заготовок — механічна (шліфування, сколювання задирок) або термічна (пальникове обпалення поверхні), залежно від рівня забруднення та типу сталі. Це усуває поверхневі дефекти, окисли, тріщини або задирки, що можуть зашкодити подальшій прокатці.

Якість контролюється системами Q-Art, які сканують поверхню зливка в режимі реального часу для виявлення дефектів, відхилень геометрії та розмірів. Також встановлено теплові сканери та лазерні вимірювачі, які моніторять температуру, ширину й товщину сляба, забезпечуючи відповідність готової продукції специфікації.

7. Маркування слябів (аналог voestalpine Linz)

7.1. Позичіонування та ідентифікація

Після завершення різання сляб транспортується до зони сканування, де автоматично зчитуються його довжина, геометричні параметри та ID плавки. Система транспортування центрує сляб на конвеєрі, забезпечуючи точне позиціонування для нанесення маркування.

7.2. Маркувальна машина

На Каметсталі передбачене використання двох основних технологій маркування, що відповідають світовим практикам (зокрема voestalpine Linz):

Dot Peen Marking (ударно-точкове гравірування) – За допомогою пневматичного або електромеханічного штифта вибивається інформація безпосередньо на поверхню сляба.– Маркується heat number, се-

рійний номер, QR- або штрих-код.– Перевага: маркування не стирається при нагріванні, стійке до механічного впливу та термічних обробок.

Paint Marking Robot (роботизоване фарбування) – Робот наносить маркування жаростійкою фарбою (зазвичай білою, жовтою або чорною — залежно від контрасту з поверхнею). – Формат нанесення: номер плавки, порядковий номер сляба, габарити, дата виробництва. – Перевага: висока видимість, швидкість нанесення, зручність для подальшого візуального контролю.

7.3. Контроль і зчитування

Для перевірки якості маркування застосовується Vision System (система машинного зору), яка:

– автоматично зчитує нанесену інформацію, – оцінює контрастність, чіткість і читабельність символів, – у разі помилки або неповного маркування подає сигнал на повторне нанесення або на операторський пульт.

7.4. Інтеграція з інформаційною системою

Уся інформація про маркування автоматично передається до MES / ERP-системи, що дозволяє:

– відстежувати кожен сляб на всіх етапах виробництва й логістики, – прив'язати сляб до конкретної плавки, замовлення або партії, – сформувати цифровий паспорт виробу з усіма технічними й якісними параметрами, доступний для контролю якості, клієнтів і сертифікації.

8. Передача сляба

Після маркування сляб автоматично транспортується до подальшого технологічного етапу залежно від виробничого плану:

Автоматизоване зберігання — якщо прокат не виконується негайно, сляби розміщуються на автоматизованому складі, де система управління відстежує їхнє місцезнаходження, температуру та послідовність видачі.

Уся інформація про сляб (номер плавки, розміри, параметри виробництва, маркування) передається в логістичну та виробничу ІТ-систему (MES/ERP) для подальшого контролю, простежуваності та планування прокатного процесу.

9. Автоматизовані системи управління

МБЛЗ на «Каметсталі» буде оснащена сучасними автоматизованими системами керування, які забезпечуватимуть стабільну якість заготовок і гнучкість управління процесом:

Q-COOL — система динамічного управління розпилюванням у вторинному охолодженні. Працює на основі температурних моделей, забезпечуючи рівномірне охолодження зливка по всій довжині та поперечному перерізу.

Q-CORE — система управління режимом м'якого обтиснення (Soft Reduction) на виході з зони затвердіння. Вона використовує дані про глибину рідкого ядра для точного стиснення зливка, щоб зменшити порожнини в серцевині.

LPC Solidification Model — безсіткова математична модель тверднення, яка в реальному часі прогнозує температурні поля та фронт кристалізації по всій довжині зливка.

Q-MAP — моніторинг температури мідних плит кристалізатора;

Q-Level — точний контроль рівня меніска сталі;

Q-Art — контроль якості поверхні зливка після різання та очищення.

4.6 Розрахунок параметрів МБЛЗ

Швидкість розливки:

$$V = \frac{G * \mu}{0,9t}, \text{ т/хв,}$$

де G – садка конвертора, т;

μ – коефіцієнт виходу придатного;

0,9 – коефіцієнт, що враховує зниження швидкості на початку і при кінці розливки;

t – цикл розливки, хв.

Глибина рідкої фази:

$$L = \frac{340 V H}{B \rho},$$

де H , B – товщина і ширина зливка, м;

340 – коефіцієнт повної кристалізації;

ρ – щільність сталі, т/м³.

Радіус зони вторинного охолодження:

$$R = \frac{2 L}{\pi}, \text{ м.}$$

Річна продуктивність:

$$A_{\text{річна}} = 1440 \Phi V, \text{ т/рік}$$

де Φ – фактичний час роботи МБЛЗ за рік, діб.

Отримані значення зведемо в таблицю.4.8

Таблиця 4.8 –Значення параметрів

Параметр	Значення	Одиниці виміру
Цикл плавки 1 конвертора	33	хв
Цикл розливки від 2 конверторів	16.5	хв
Садка конвертора	250	тонн
коеф-нт виходу придатного	0.92	тонн
кількість рівчаків	2	шт
Вагова швидкість розливки	7.744	т/хв
Висота заготовки,м	0.3	м
Ширина заготовки,м	2	м
Щільність металу	7.2	т/м ³
Глубина рідкої фази	54.854	м
Радіус установки МБЛЗ	34.939	м
Лінійна швидкість розливання	1.793	м/хв
тривалість капітальних ремонтів	20	діб
тривалість ПП ремонтів	35	діб
Номінальний час роботи МБЛЗ	310	діб
Фактичний час роботи	294.5	діб
Час підготовки	110	хв
Час профілактики	300	хв
Загальний час роботи МБЛЗ	704.5	хв
Річна продуктивність	3.28	млн. т / рік

Висновок: при схемі роботи 3/2 250-тонних конверторів продуктивність МБЛЗ складає 3,28 млн. тонн на рік.

5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ НА МБЛЗ

Питання техніки безпеки та охорони праці

Основою охорони праці є Закон України «Про охорону праці» (№ 2694-XII), який гарантує працівникові право на безпечні й нешкідливі умови праці. Працівник зобов'язаний знати й виконувати нормативно-правові акти та внутрішні інструкції з охорони праці, користуватися засобами колективного і індивідуального захисту, проходити медичні огляди, негайно доповідати керівництву про небезпеки і відмовлятися від роботи в разі загрози життю чи здоров'ю. Роботодавець відповідно до законодавства повинен забезпечити навчання з охорони праці, інформувати працівника під розписку про наявні небезпечні фактори на робочому місці і видати безплатно спецодяг, спецвзуття та інші ЗІЗ. Зокрема, на підприємстві мають бути розроблені локальні інструкції з охорони праці – наприклад, ІОП 10.26.22 для розливальника сталі та ІОП 10.36.22 для оператора машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) – які детально регламентують порядок підготовки до зміни, виконання технологічних операцій та дій у надзвичайних ситуаціях.

Загальні вимоги безпеки

Підготовка до роботи. Працівник повинен приходити на зміну в повному комплекті спецодягу й спецвзуття (тепловідштовхувальні костюм, шкіряні рукавиці, каска з забралом, захисні окуляри тощо) і одразу доповідати про готовність до роботи. На зборах при прийомі зміни перевіряють наявність і справність устаткування, засобів пожежогасіння, захисних огорожень, світлосигнальних приладів та необхідних інструментів. Користуватися несправним інструментом або обладнанням заборонено; всі виявлені несправності повідомляють безпосередньому

керівникові. Працівник повинен бути уважним до чистоти робочої зони: сміття і зайві матеріали вивозять за межі робочого простору, проходи тримають вільними, засоби індивідуального захисту – у справному стані. Перед початком робіт також перевіряють роботу аварійних і запобіжних систем, організацію вентиляції та можливість безпечної евакуації персоналу.

Дії під час роботи. На відділенні розливання слід суворо дотримуватися технологічних приписів. До основних правил належать: заборона розпивання напоїв чи вживання їжі в зоні виробництва; щоденне проведення інструктажів і нараду перед початком робочої зміни; заборона роботи працівникам у стані сп'яніння або при виявленому захворюванні, яке може призвести до аварійної ситуації. При виникненні аварій чи небезпечних подій працівник зобов'язаний негайно зупинити процес, подати тривожний сигнал і повідомити чергового або керівника зміни, після чого надати домедичну допомогу постраждалим та ізолювати небезпечну зону. Всі працівники повинні бути проінструктовані про порядок дій при пожежі, утворенні газових забруднень чи інших надзвичайних ситуаціях (на підприємстві повинен бути затверджений план локалізації аварійних ситуацій і навчальні плани з нього).

Обладнання і умови праці. Для підприємств чорної металургії діють державні правила охорони праці, зокрема вимоги до безпеки устаткування МБЛЗ (НПАОП 27.4-1.12-06 та ДНАОП 1.2.10-1-96). Згідно з ними, всі вузли та механізми безперервного розливання повинні бути вхідного статусу – механізовані та обладнані дистанційним управлінням та аварійними вимикачами. Система вторинного охолодження заготовок має бути виділена окремим приміщенням із теплоізоляцією стін

і вентиляцією, а під час лиття доступ у нього обслуговуючому персоналу заборонений. Вся контактна поверхня кристалізатора та конвеєрів для заготовок має бути вогнетривкою, зібрана герметично, а на випадок припинення води у системі охолодження автоматика повинна подавати звуковий і світловий аварійний сигнал і зупиняти процес лиття. Розливний майданчик та робочі місця мають бути обладнані стаціонарними огорожами, поручнями та термозахисними екранами (загальні вимоги: вогнетривка підлога, висота поручнів – не менше 1 м, щонайменше два шляхи евакуації). Різальні й зварювальні роботи на МБЛЗ проводяться в постійних місцях проведення вогневих робіт. На підприємстві має бути створена охорона праці (майстер ділянки або спеціаліст), що стежить за виконанням норм і проводить перевірки робочих місць і стану СІЗ.

Безпека праці розливальника сталі

Функції .

Розливальник сталі є ключовою посадовою особою на ділянці машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), відповідальною за безпечне, безперервне та якісне перенесення рідкої сталі з ковша в кристалізатор. До його основних обов'язків належить:

- прийом сталерозливного ковша з рідким металом;
- позиціонування ковша над проміжним ковшем;
- керування шибром або запірним механізмом;
- контроль початку та завершення розливу;
- спостереження за рівнем сталі, шлаковими включеннями та стабільністю потоку;
- координація з оператором МБЛЗ та кранівником;

- забезпечення дотримання температурного та часових режимів розливання;
- реагування на позаштатні ситуації (зміна струменя, припинення подачі, виявлення шлаку тощо).

Ризики.

Робота розливальника пов'язана з дією низки шкідливих та небезпечних виробничих факторів:

- Високі температури: рідка сталь має температуру до 1600 °С. Є ризик термічних опіків у разі розбризкування металу або контакту з гарячими поверхнями.
- Бризки розплаву або шлаку: при попаданні вологи у струмінь або у виливниці можливе «розстрілювання» (вибухоподібне виплескування).
- Висока фізична й психологічна напруга: робота в умовах шуму, вібрацій, високих температур та відповідальності за технологічну безперервність.
- Небезпека ураження електричним струмом: при контакті з обладнанням, яке має відкриті або пошкоджені електроланцюги (наприклад, механізми шиберів або платформи).
- Можливість механічних травм: удар ковшем, падіння з платформи, затискання кінцівок механізмами.
- Хімічні фактори: утворення парів оксидів при розливанні або очищенні ливарного обладнання.
- Недостатнє освітлення, волога підлога, слизькі ділянки: створюють додаткові ризики падіння.

Безпека праці оператора МБЛЗ

Функції.

Оператор машини безперервного лиття зливків (МБЛЗ) здійснює керування та контроль усіх етапів процесу лиття сталевих заготовок – від моменту надходження рідкої сталі в кристалізатор до подачі охолодженої заготовки в зону різання або на склад. Його основні функції включають:

- керування обладнанням з пульта керування ;
- контроль рівня сталі в кристалізаторі, швидкості витягування заготовки, температурного режиму та режимів охолодження;
- координація з розливальником сталі щодо початку та завершення розливу;
- контроль подачі води у вторинне охолодження;
- регулювання швидкості витягування заготовки відповідно до температурного градієнта та моделі тверднення;
- виявлення та усунення відхилень у роботі систем МБЛЗ;
- передача змін і складання звітів;
- взаємодія з персоналом різання, маркування, транспортування.

Ризики.

У процесі роботи оператор МБЛЗ піддається дії складних фізичних, теплових та техногенних факторів:

- Небезпека опіків: у разі порушення герметичності системи охолодження можливий викид пари або окропу.
- Загроза травмування рухомими частинами: зони витягування заготовки, приводи валків, гідроциліндри – є джерелами здавлювання, затягування, удару.

- Ураження електричним струмом: система керування МБЛЗ працює під напругою, зокрема силова частина приводу та електронагрівачі.
- Висока відповідальність за технологічну стабільність: збої в роботі можуть призвести до застрягання заготовки, переливів металу, затверднення в кристалізаторі.
- Навантаження на зір та слух: постійне спостереження за пультом, відеонагляд, сигналізація, робота в умовах шуму.
- Ризик аварій у разі порушення охолодження: зупинка подачі води в систему може спричинити перегрів кристалізатора, утворення тріщин у заготовці або навіть прорив рідкого металу.
- Стресові умови праці: необхідність швидко реагувати на позаштатні ситуації, вести координацію з кількома змінними підрозділами (розливальники, різальники, крановики тощо).

Надзвичайні ситуації. У разі аварії на МБЛЗ (пожежа, витік металу, розгерметизація трубопроводів, зупинка охолодження) оператор негайно натискає кнопку “стоп” усієї системи, подає тривожний сигнал всім змінам і виконує інструкції плану аварій. Персонал евакуюється через два запасні виходи, причому один вихід (ряд виробничих люків у підлозі) відкривається з боку виробничого приміщення. Після зупинки установки оператор разом із начальником ділянки складає детальний звіт про причини аварії.

Інші працівники відділення МБЛЗ

Хоча основні завдання виконують розливальник сталі та оператор МБЛЗ, безпека залежить і від діяльності суміжних робітників. Наприклад, машиніст мостового крана повинен безпечно керувати краном

відповідно до вимог, не піднімати вантаж з перевантаженням, мати допуск до управління краном за власною інструкцією. Газозварники та різальники повинні попередньо перевіряти герметичність шлангів, відповідати за безпечне користування кисневими і газовими балонами. Кожен працівник цеху має пройти інструктаж з пожежної безпеки та періодично – електробезпеки, оскільки у ливарному виробництві часто використовують високовольтне обладнання та приводні двигуни. Усі робітники зобов'язані дотримуватися політики охорони праці підприємства, що включає щорічні медогляди, навчання з безпеки праці та правила поведінки (наприклад, заборона використання мобільного телефону під час роботи, проходження спецперевірок перед допуском до особливо небезпечних робіт і т.д.)

Підсумок. Таким чином, робота з машиною безперервного лиття заготовок вимагає суворого дотримання як загальних законодавчих та галузевих норм з охорони праці, так і специфічних інструкцій підприємства (ІОП 10.26.22 та 10.36.22). Основні питання безпеки – організація робочої зміни (перевірка обладнання, НПП, складання звітності), застосування необхідних ЗІЗ (спецодяг, каски, респіратори, захисні окуляри), виконання технологічних приписів (контроль температури, тиску та чистоти форм), використання світлосигнальної індикації та аварійних систем. Ретельне дотримання цих вимог значно знижує ризик нещасних випадків і забезпечує безперебійну роботу машини безперервного лиття заготовок.

ВИСНОВКИ

Доцільність впровадження слябової МБЛЗ з технічної та економічної точки зору: впровадження нової слябової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є стратегічно обґрунтованим рішенням, яке поєднує технічну доцільність, економічну ефективність та відповідає довгостроковим цілям розвитку підприємства і всієї Групи «МЕТІНВЕСТ».

Технічна доцільність полягає у здатності нового обладнання забезпечити випуск широкого сортаменту слябів великого перерізу (до 250 мм завтовшки), необхідних для виробництва сучасного листового і плитного прокату. Нова МБЛЗ дозволяє інтегрувати передові технології — м'яке обтиснення, інтенсивне охолодження, автоматизований контроль дефектів — що суттєво підвищує якість заготовки, знижує рівень браку та забезпечує стабільність і повторюваність виробничого процесу.

Економічна ефективність модернізації зумовлена зниженням енерговитрат, технологічних втрат металу та підвищенням виходу придатної продукції. Здатність виробляти сляби високої якості без проміжної переплавки чи обробки слитків істотно скорочує виробничий цикл, знижує собівартість та підвищує рентабельність. Додаткову економічну вигоду забезпечує можливість експорту частини слябів на зовнішні ринки, де зберігається стабільний попит на напівфабрикати високої якості, що сприяє диверсифікації джерел прибутку підприємства.

Стратегічна необхідність модернізації обумовлена як втратою потужностей з виробництва слябів на «Азовсталі» внаслідок бойових дій, так і запланованим виведенням з експлуатації мартенівських печей

на «Запоріжсталі» у 2028 році. В цих умовах КАМЕТ-СТАЛЬ набуває ролі ключового компенсуючого активу, здатного забезпечити безперервність внутрішнього виробничого ланцюга Групи «МЕТІНВЕСТ» — від виплавки сталі до гарячекатаного прокату. Зокрема, нова МБЛЗ дозволить задовольнити потреби стану 1680 у слябах для виробництва листового прокату, а також частково забезпечити продукцію для зовнішніх клієнтів. Це гарантує автономність у забезпеченні напівпродуктом і зменшує залежність від зовнішніх постачальників, що критично важливо в умовах воєнного ризику, логістичних обмежень і глобальної нестабільності.

Перспектива розвитку включає повну інтеграцію нової МБЛЗ у цифрову систему управління виробництвом, підвищення прозорості та гнучкості операцій, а також готовність до екологічної трансформації. Поєднання слябової МБЛЗ із сучасними сталеплавильними технологіями (EAF) та прямим відновленням заліза (DRI) створює основу для переходу до низьковуглецевої, а в перспективі — безвуглецевої металургії. Це повністю узгоджується з глобальними тенденціями декарбонізації промисловості та стратегічним курсом Групи «МЕТІНВЕСТ» на створення сучасної, енергоефективної та екологічно відповідальної металургії.

Впровадження системи управління модернізацією.

У межах реалізації проєкту модернізації виробництва безперервної заготовки на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» була обґрунтована необхідність трансформації існуючої моделі управління шляхом впровадження сучасної системи проєктного менеджменту. Така система є ключовим фактором забезпечення своєчасної, ефективної та узгодженої реалізації технічного переоснащення.

Перехід до цифрово орієнтованої гнучкої моделі управління дозволяє оперативно приймати рішення на основі даних, інтегрувати технології в реальному часі, а також забезпечує прозорість на всіх етапах модернізації. Це особливо актуально з огляду на складність міжфункціональної взаємодії (інжиніринг, виробництво, фінанси, ІТ, персонал).

Створення офісу управління проєктами (РМО) дало змогу централізувати координацію, контролювати дотримання строків, бюджету та обсягів робіт. РМО виступає ядром управління змінами, фіксує відхилення, формує звітність для керівництва та сприяє взаємодії зі стейкхолдерами.

Використання методологій Agile, Lean та Kaizen забезпечило гнучкість у реалізації проєкту. Agile підходи дали змогу розбити реалізацію на ітерації, вчасно реагувати на зміни та адаптувати технічні рішення. Lean-підхід дозволив виявити і усунути втрати, оптимізувати логістику та скоротити тривалість окремих фаз. Залучення працівників до ініціатив Kaizen сприяло формуванню культури постійних покращень.

Система управління ризиками була інтегрована у всі фази проєкту: від проєктування до монтажу та запуску. Це дозволило заздалегідь ідентифікувати ключові ризики (затримки постачання, технічні невідповідності, опір персоналу, зовнішні загрози) та розробити плани реагування. Регулярне оновлення карти ризиків дало змогу адаптувати дії в реальному часі.

Кадрова трансформація супроводжувала впровадження змін: було розроблено програми навчання персоналу новим системам управління, цифровим платформам, принципам гнучкої роботи. Ключові ролі в новій структурі були переосмислені, а відповідальність — перерозподілена відповідно до нових цілей проєкту.

Стратегічне узгодження з корпоративною логікою Групи «МЕТІН-ВЕСТ» гарантує, що запропонована система управління не є тимчасовим рішенням, а є частиною довгострокової трансформації всієї виробничої системи. Зокрема, підхід до проєктного управління, діджиталізація, ESG-орієнтованість і розвиток людського капіталу відповідають загальному курсу Групи на модернізацію та сталий розвиток.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата звернення: 03.03.2025).
2. Midrex Technologies. URL: <https://www.midrex.com/> (дата звернення: 12.04.2025).
3. Association for Iron & Steel Technology. URL: <https://www.aist.org/> (дата звернення: 25.02.2025).
4. Maxton Manufacturing Co. URL: <https://www.maxtonco.com/> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Tenova. URL: <https://www.tenova.com/> (дата звернення: 18.01.2025).
6. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/> (дата звернення: 29.03.2025).
7. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/> (дата звернення: 22.05.2025).
8. Cleveland-Cliffs Inc. URL: <https://www.clevelandcliffs.com/> (дата звернення: 07.04.2025).
9. Kobelco (Kobe Steel, Ltd.). URL: <https://www.kobelco.co.jp/> (дата звернення: 19.06.2025).
10. GMK Center. URL: <https://gmk.center/> (дата звернення: 01.07.2025).
11. ArcelorMittal Corporate. URL: <https://corporate.arcelormittal.com/> (дата звернення: 26.01.2025).
12. Thunder Said Energy. URL: <https://www.thundersaidenergy.com/> (дата звернення: 15.03.2025).

13. Energiron. URL: <https://www.energiron.com/> (дата звернення: 11.02.2025).
14. IspatGuru. URL: <https://www.ispatguru.com/> (дата звернення: 08.07.2025).
15. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/> (дата звернення: 04.06.2025).
16. FRC Global. URL: <https://www.frcglobal.com/> (дата звернення: 28.05.2025).
17. Steelonthenet.com. URL: <https://www.steelonthenet.com/> (дата звернення: 14.04.2025).
18. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin). URL: <https://diw.dediw.de/> (дата звернення: 21.01.2025).
19. Columbia Business School. URL: <https://business.columbia.edu/> (дата звернення: 06.03.2025).
20. Transition Asia. URL: <https://transitionasia.org/> (дата звернення: 13.06.2025).
21. Nemag. URL: <https://www.nemag.com/> (дата звернення: 02.02.2025).
22. Global Steel Climate Council. URL: <https://www.globalsteelclimatecouncil.org/> (дата звернення: 23.05.2025).
23. Recycling Today. URL: <https://www.recyclingtoday.com/> (дата звернення: 30.06.2025).
24. Stock Titan. URL: <https://www.stocktitan.net/> (дата звернення: 09.04.2025).
25. Voestalpine. URL: <https://www.voestalpine.com/> (дата звернення: 27.02.2025).

26. Substech. URL: <https://www.substech.com/> (дата звернення: 20.05.2025).
27. Leybold. URL: <https://www.leybold.com/> (дата звернення: 16.06.2025).
28. SMS Group. URL: <https://www.sms-group.com/> (дата звернення: 17.01.2025).
29. Primetals Technologies. URL: <https://www.primetals.com/> (дата звернення: 05.07.2025).
30. Укрметпром. URL: <https://www.ukrmetprom.org/> (дата звернення: 19.03.2025).
31. МЕТИНВЕСТ-СМЦ. URL: <https://metinvest-smc.com/> (дата звернення: 03.06.2025).
32. Danieli. URL: <https://www.danieli.com/> (дата звернення: 01.05.2025).
33. 24 Канал. URL: <https://www.24tv.ua/> (дата звернення: 11.01.2025).
34. Мінпром. URL: <https://minprom.ua/> (дата звернення: 09.02.2025).
35. Interpipe Steel. URL: <https://www.interpipesteel.biz/> (дата звернення: 28.06.2025).
36. Steel Plantech. URL: <https://www.steelplantech.com/> (дата звернення: 12.05.2025).
37. Українська асоціація сталевих конструкцій. URL: <https://uas.su/> (дата звернення: 24.04.2025).
38. Britannica. URL: <https://www.britannica.com/> (дата звернення: 06.06.2025).

39. World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/> (дата звернення: 30.01.2025).

40. Concorde Capital. URL: <https://concorde.ua/> (дата звернення: 13.07.2025).

41. NTT Data (U.S.). URL: <https://us.nttdata.com/> (дата звернення: 17.05.2025).

42. МЕТИНВЕСТ Холдинг. URL: <https://metinvestholding.com/> (дата звернення: 07.03.2025).

43. Грибков Е.П., Крюков Р.Є. Автоматизоване проєктування складу обладнання прокатного стану. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 39 <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/542/14392/30328-1>

44. Кухар В. В., Грибков Е. П., Малій Х. В., Крюков Р. В., Тимошенко Д. О. Управління викидами в металургійній галузі України в умовах декарбонізації, шляхи досягнення вуглецевої нейтральності та застосування інструментів менеджменту. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2025. Вип. 1(150). С. 65-73 https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2025_1_65.pdf